

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Aleksandar Đurković

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Daniel R. Schneider

Student:

Aleksandar Đurković

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 3-09-2013	Prilog
Klasa: 002-04/13-6/4	
Ur.broj: 15-1703-13-369	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Aleksandar Đurković** Mat. br.: 0035168157

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Učinkovito korištenje sunčeve energije za proizvodnju električne energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Efficient use of solar energy for electricity generation**

Opis zadatka:

Komercijalno iskorištavanje toplinske energije sunca za proizvodnju električne energije danas se odvija na dva načelno bitno različita načina. Prvi je korištenje fotonaponskih panela koji iskorištavaju fotonaponski efekt. Drugi način je uporaba Rankinovog kružnog ciklusa u kojem se osim vodene pare koriste i organske radne tvari prikladnije za niže temperature ogrjevnog spremnika.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Napraviti matematički model Rankinovog ciklusa s jednim od organskih radnih medija.
2. Napraviti matematički model Rankinovog ciklusa s vodom kao radnim medijem u kojem se voda predgrijava sunčevom energijom i zatim dogrijava prirodnim plinom do temperatura prikladnih za vodu kao radni medij.
3. Napraviti satnu simulaciju godišnjeg pogona postrojenja s organskim radnim medijem, postrojenja s vodom kao radnim medijem i fotonaponskog postrojenja.
4. Napraviti tehnoeкономsku analizu svih vrsta postrojenja uzimajući u obzir trenutno važeće otkupne cijene električne energije.

Svi potrebni dodatni ulazni podaci za proračun nalaze se kod mentora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Daniel R. Schneider

Prof. dr. sc. Igor Balen

SAŽETAK RADA

Sunčeva energija koristi se još od drevne povijesti. Napredovanjem novih tehnologija sunce sve više dobiva na značaju kao veoma bitan obnovljiv izvor energije uz vodu i vjetar. U današnje vrijeme energija sunca se vrlo aktivno koristi, a najčešće na dva načina: a) preko paraboličnih kolektora koje usmjeravaju zrake sunca u jednu žarišnu točku i tako zagrijavaju fluid u cijevi koji se kasnije koristi kao prenosioč topline na radni medij b) preko fotonaponskih panela koji sunčevu energiju direktno pretvaraju u električnu energiju. Parabolični kolektori mogu se priključiti u Rankineov ciklus kao potpuna ili polovična zamjena za fosilna goriva pri namjeni zagrijavanja i isparivanja radnog medija. Potpuna primjena u ORC-u i djelomična primjena u RC-u s vodom mogli bi znatno poboljšati i olakšati načine nalaženja izvora topline. Pitanje je samo do koje mjere će ti solarni sustavi biti primjenjivi i koliko nam vremenska ovisnost, tj. prognoza može ići na ruku. Hoće li imati znatnog učinka smanjivanje potrošnje plina i hoće li se isplatiti početna investicijska ulaganja u obnovljive izvore za koje se već zna da su jako skupa, ostaje nam vidjeti. Uz dobru pripremu, regulaciju i rukovođenje sve je moguće.

Ključne riječi: ORC, RC voda, PV, simulacija, tehnoekonomska analiza, matematički model, solarna energija.

SADRŽAJ

1. UVOD	10
2. POSTROJENJA	11
2.1. RC postrojenje	11
2.1.1. ORC postrojenje	13
2.2. Procesi u Rankineovom ciklusu	14
3. NAČINI PRIKUPLJANJA SUNČEVE ENERGIJE	16
3.1. Parabolični kolektor (Parabolic trough collector)	16
3.1.1. Način rada PTC-a	17
3.2. Fotonaponski paneli (Fotonaponski solarni sustavi)	18
3.2.2. Način rada PV panela	20
4. MATEMATIČKI MODEL RANKINEOVOG CIKLUSA	21
4.1. ORC	21
4.2. RC s vodom	25
4.3. Postavljanje problema	28
5. SATNA SIMULACIJA GODIŠNJEG POGONA POSTROJENJA	29
5.1. Satna simulacija postrojenja s organskim radnim medijem	31
5.2. Satna simulacija postrojenja s vodom kao radnim medijem	37
5.3. Satna simulacija fotonaponskog postrojenja	42
6. TEHNOEKONOMSKA ANALIZA POSTROJENJA	47
7. ZAKLJUČAK	51

POPIS SLIKA

Slika 1. T-s dijagram tipičnog Rankineovog ciklusa između tlakova 0,06 i 50 bar

Slika 2. T-s dijagram idealnog/realnog ORC-a

Slika 3. Rankineov ciklus s pregrijačem pare

Slika 4. Parabolični kolektori u sunčevoj termoelektrani

Slika 5. Prikaz rada sunčevog polja s PTC-ima te prikaz kako se paralelne Sunčeve zrake skupljaju u žarištu

Slika 6. Fotonaponska matrica sastavljena je od nekoliko solarnih ćelija

Slika 7. Solarna ćelija

Slika 8. "Solar park" ili "PV park"

Slika 9. Fotoelektrična konverzija

Slika 10. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača ulje - R245fa (primjer)

Slika 11. T-s dijagram ORC-a s R245fa

Slika 12. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača ulje - voda (primjer)

Slika 13. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača plin - voda (primjer)

Slika 14. T-s dijagram RC-a s vodom

Slika 15. Sunčeva insolacija kroz 1. siječnja unutar 24 sata

Slika 16. Shema ORC postrojenja sa solarnim kolektorima

Slika 17. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (1)

Slika 18. Proračun dobivanja el. snage kroz 3. srpnja (1)

Slika 19. Dobivena električna snaga kroz dane u godini (1)

Slika 20. Shema RC postrojenja s vodom sa solarnim kolektorima i dodatnim grijanjem plinom

Slika 21. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (2)

Slika 22. Dijagram dobivenih toplina od sunca i plina kroz 1. siječnja (2)

Slika 23. Proračun dobivanja el. snage kroz 8. srpnja (2)

Slika 24. Dijagram dobivenih toplina od sunca i plina kroz 8. srpnja (2)

Slika 25. Dobivena električna snaga kroz sate u godini (2)

Slika 26. Shema fotonaponskog postrojenja

Slika 27. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (3)

Slika 28. Proračun dobivanja el. snage kroz 3. srpnja (3)

Slika 29. Dobivena električna snaga kroz dane u godini (3)

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina izmjenjivača
A_{kol}	m^2	površina zrcala paraboličnog kolektora
$A_{kol,max}$	m^2	maksimalna površina zrcala paraboličnog kolektora
A_{pan}	m^2	površina fotonaponskog sustava, panela
k	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	koeficijent prolaza topline
p	bar	tlak
P_t	W, kW	izlazna snaga na turbini, električna snaga u jednom satu
$P_{t,uk}$	W, kW	izlazna snaga na turbini, električna snaga u jednoj godini
$q_{ins,max}$	W/m^2	maksimalna sunčeva insolacija u jednom satu
$q_{ins,n}$	W/m^2	sunčeva insolacija u jednom satu
$q_{ins,uk}$	W/m^2	ukupna sunčeva insolacija u jednoj godini
Q_{plin}	W, kW	toplina proizvedena izgaranjem plina u jednom satu
$Q_{ulož}$	W, kW	uložena toplina u neki proces ili ciklus u jednom satu
$Q_{ulož,uk}$	W, kW	ukupno uložena toplina u neki proces ili ciklus u jednoj god
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
η	-	stupanj djelovanja, stupanj korisnosti

IZJAVA STUDENTA

Ovaj rad radio sam isključivo sam bez ičije pomoći od strane kolega, prijatelja, roditelja ili nekoga drugoga. Do svih podataka, izračuna, dijagrama i simulacija došao sam vlastitim putem te uz pomoć literature. Jedinu pomoć koju sam dobio je početne ideje od višeg asistenta dr.sc. Mislava Čehila te tablicu mjerenja insolacije u gradu Zagrebu kroz godinu dana u 8760 sati od znanstvenog novaka dr.sc. Gorana Krajačića. Svi programi i potprogrami su izrađeni isključivo s moje strane i nitko mi nije pomagao ili ih radio za mene.

Zahvaljujem se profesoru i asistentu na danoj ideji za rad te svima koji su mi pružali podršku u izradi ovog rada.

1. UVOD

Sunčeva energija je zračenje svjetlosti i topline sa Sunca koju ljudi koriste od drevne povijesti upotrebom raznih neprestano napredujućih tehnologija. Sunčevo zračenje skupa sa sekundarnim sunčevim izvorima kao što su energija vjetra i energija valova, hidroenergija i biomasa zajedno čine većinu raspoložive obnovljive energije na Zemlji. Upotrebljava se samo neznatan dio raspoložive sunčeve energije. Sunčeva energija omogućuje proizvodnju pomoću toplinskih strojeva ili fotonaponski. Jednom proizvedena, njene primjene ograničava samo ljudska mašta. Dio popisa primjene sunca uključuje grijanje i hlađenje prostora u sunčevoj gradnji, pitku vodu kroz destilaciju i dezinfekciju, rasvjetu, sunčevu toplu vodu, toplinu za sunčevo kuhanje, visokotemperaturnu industrijsku vodu. Sunčeve tehnologije široko se karakteriziraju kao ili pasivna sunčeva ili aktivna sunčeva, ovisno o načinu prikupljanja, pretvaranja i raspoređivanja sunčeve svjetlosti. Aktivne sunčeve tehnike uključuju primjenu fotonaponskih ploča i sunčeva toplinskog kolektora (s električnom ili mehaničkom opremom) kako bi se sunčeva svjetlost pretvorila u iskoristive proizvode. Pasivne sunčeve tehnike uključuju orijentaciju zgrada prema suncu, odabir materijala s povoljnijim svojstvima termalna masa ili svjetlosnim svojstvima raspršenja te oblikovanjem prostora u kojima zrak prirodno kruži. U ovom radu bavit ćemo se aktivnim sunčevim tehnikama gdje ćemo imati tri postrojenja: ORC gdje će se radni medij grijati kolektorima, RC s vodom gdje će se radni medij predgrijavati sunčevom energijom preko kolektora te zatim dogrijavati prirodnim plinom i fotonaponsko postrojenje. [1]

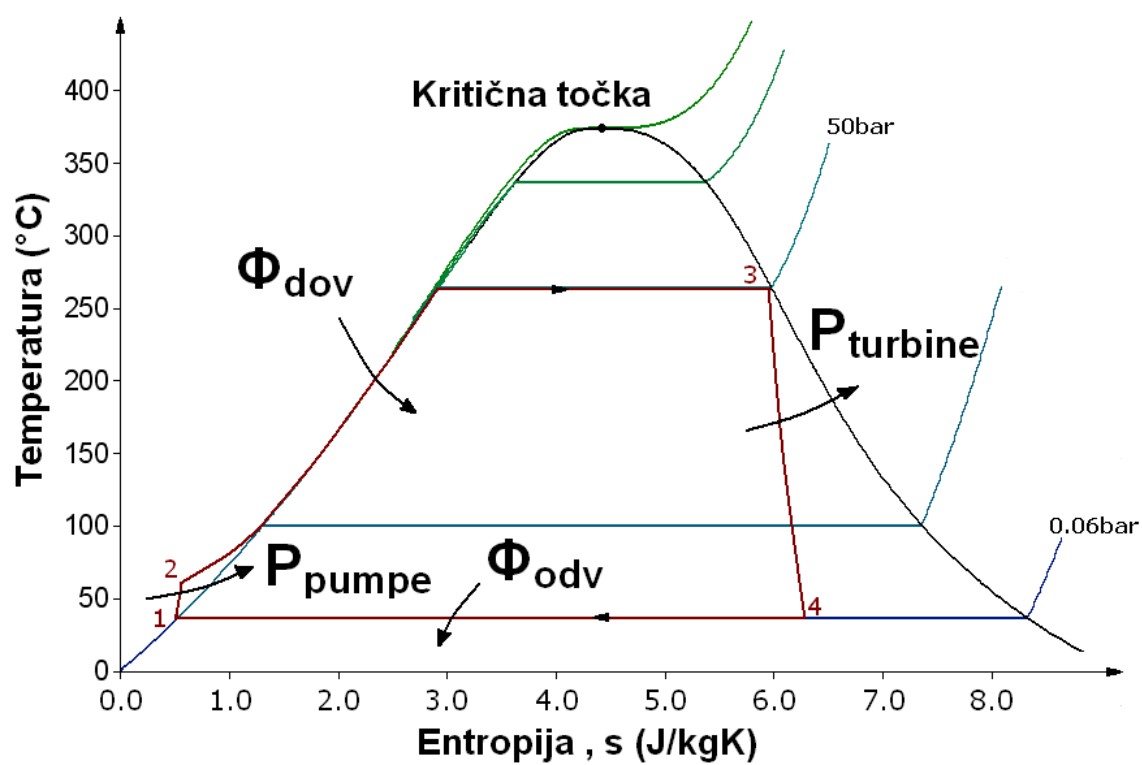
2. POSTROJENJA

2.1. RC postrojenje

Rankineov ciklus je termodinamički kružni proces koji ulaznu toplinu pretvara u mehanički rad. Proces se odvija između dvaju toplinskih spremnika, a radni medij, koji je uglavnom voda, vraća se u svoje početno stanje nakon niza termodinamičkih procesa s čime je jedan ciklus završen. Rankineov ciklus radi po modelu toplinskih strojeva. Koristi se za dobivanje mehaničkog rada koji se najčešće pretvara u električnu energiju pa je tako ovaj ciklus osnovni model rada termoelektrana i nuklearnih elektrana. [2] [4]

Za Rankineov ciklus se može reći da je to Carnotov ciklus u praksi jer su principi rada isti. Osnovna razlika je to što se procesi dovođenja i odvođenja topline u Rankineovom ciklusu odvijaju izobarno, dok se teoretskom Carnotovom ciklusu ti procesi odvijaju izotermno. Pumpa se kod Rankineovog ciklusa koristi za podizanje tlaka kapljevini, a kod Carnotovog ciklusa se komprimira plin. To je ujedno i jedna od glavnih prednosti za provođenje termodinamičkog kružnog procesa u praksi, budući da podizanje tlaka kapljevini zahtjeva vrlo malo energije u odnosu na komprimiranje plina. Nakon kondenzacije vodene pare, pumpa koja podiže tlak kapljevitoj vodi troši približno 1% do 3% snage turbine i tako omogućava veći stupanj djelovanja, odnosno efikasnost stvarnog ciklusa. [2] [4]

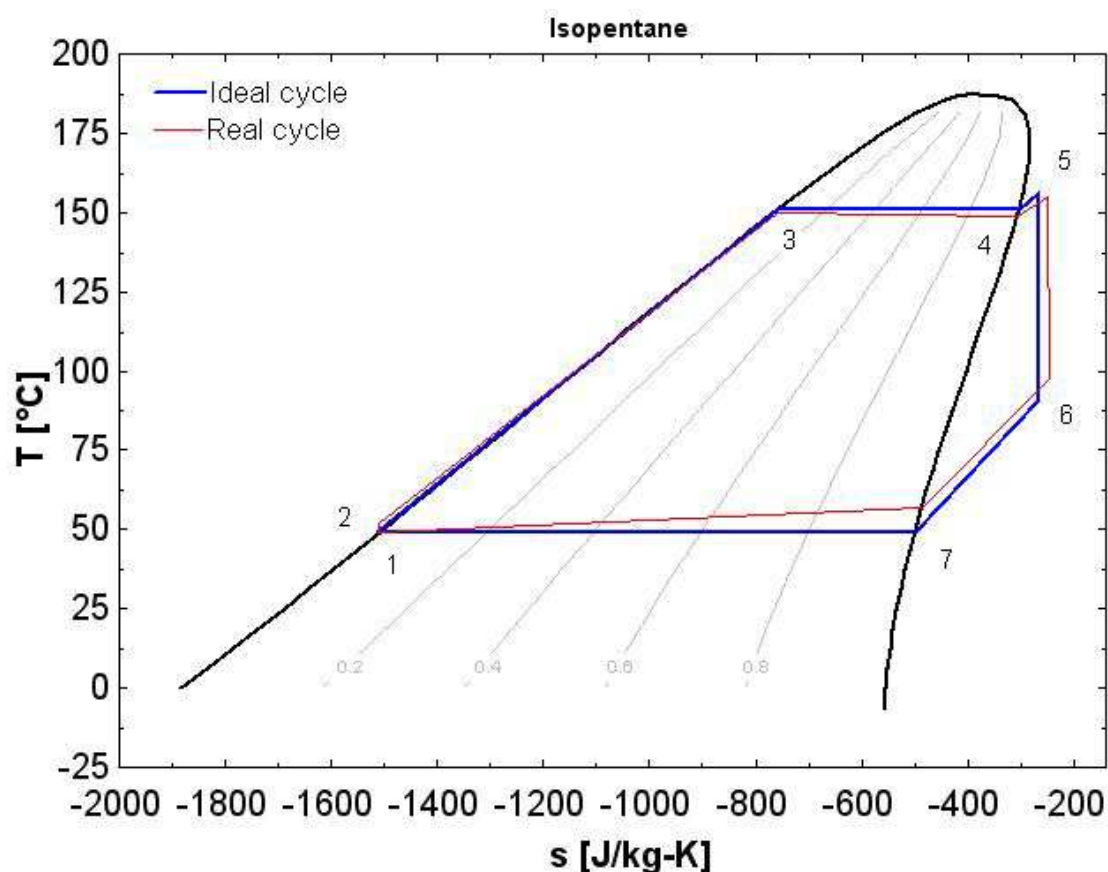
Stupanj djelovanja Rankineovog procesa ovisi o temperaturama dovođenja i odvođenja topline, a ograničen je maksimalnim temperaturama koje materijali mogu podnijeti i kritičnom točkom radnog medija. Najveću prepreku predstavlja temperatura odvođenja topline, tj. temperatura rashladnog spremnika koja je određena temperaturom okoliša. Stupanj djelovanja Rankineovog ciklusa je oko 40%, dok je teoretski stupanj djelovanja Carnotovog ciklusa oko 60%. Ulazne temperature u parnu turbinu iznose oko 565°C i to je maksimum, dok ulazne temperature za plinske turbine iznose oko 1500°C, ali unatoč tome imaju približno jednake stupnjeve djelovanja. Radni medij, odnosno voda, prolazi tijekom ciklusa kroz niz promjena te se ponovno koristi u procesu. Vodena para koja se često može vidjeti kako se izdiže iz termoeenergetskih postrojenja nije iz Rankineovog ciklusa, već je to rashladni medij koji isparava nakon što je primio otpadnu toplinu iz procesa. [2] [4]



Slika 1. T-s dijagram tipičnog Rankineovog ciklusa između tlakova 0,06 i 50 bar [2]

2.1.1. ORC postrojenje

Organski Rankine-ov ciklus za radni medij koristi neki organski fluid, kao npr. n-pentan ili toluen. To otvara mogućnost korištenja toplinskih izvora nižih temperatura. Stupanj djelovanja takvih procesa je manji, upravo zbog nižih ulaznih temperatura. Za Rankineov ciklus u definiciji vrsta radne tvari nije određena što znači da su procesi i za organske fluide isti. [2]



Slika 2. T-s dijagram idealnog/realnog ORC-a [3]

2.2. Procesi u Rankineovom ciklusu

Komponente osnovnog Rankineovog ciklusa kao osnovnog modela parne elektrane su: parni kotao, turbina, kondenzator i pumpa. Postoje četiri osnovna procesa u Rankineovom ciklusu, koji su označeni na dijagramu na slici 2.:

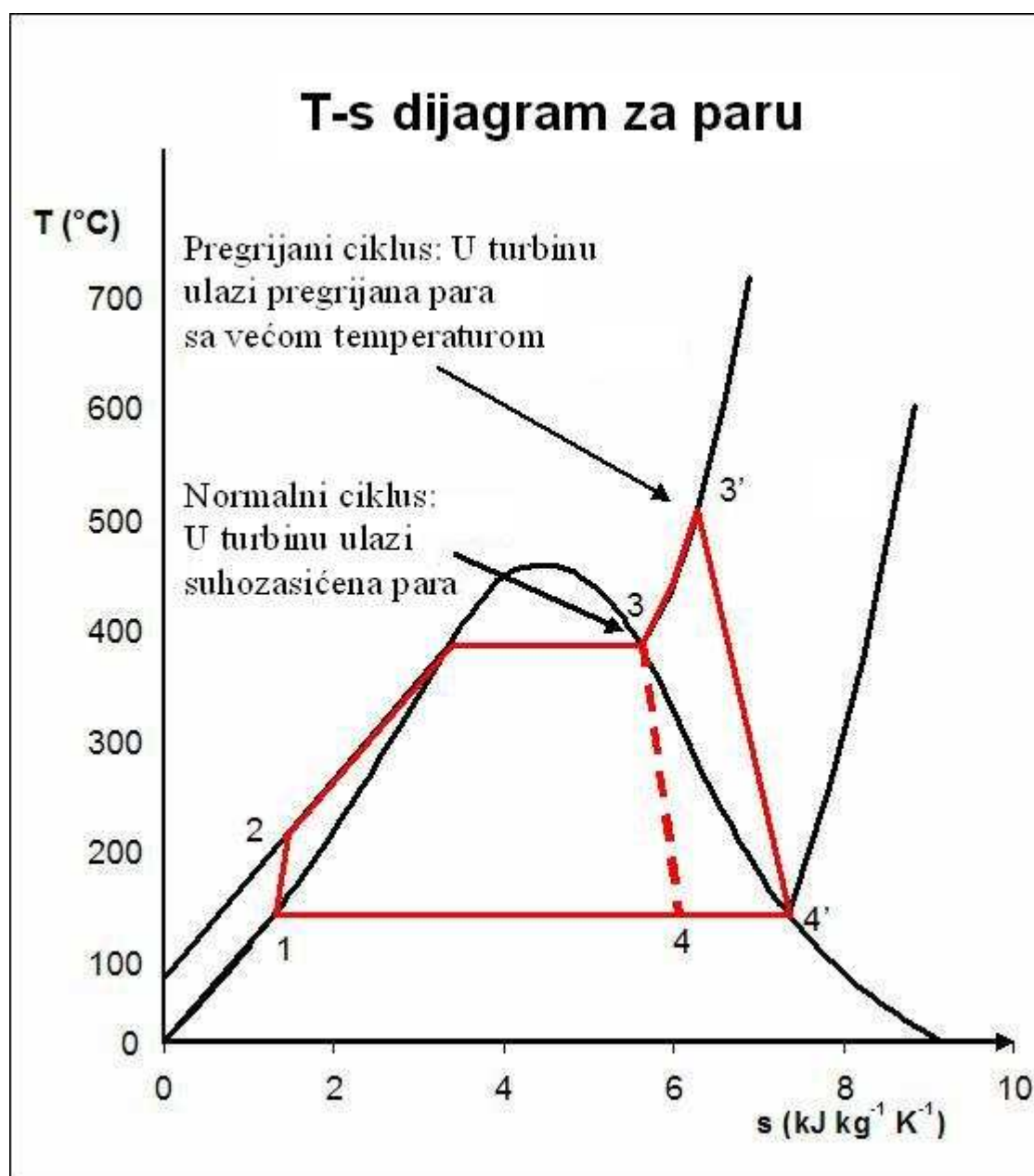
1-2: Voda se izentropski tlači na visoki tlak koji odgovara tlaku koji vlada u parnom kotlu.

2-3: U parnom kotlu se pri konstantnom tlaku voda zagrijava vrućim dimnim plinovima, nastalim od određenog goriva (alternativa je sunčeva energija), od stanja pothlađene kapljevine do stanja suhozasićene pare.

3-4: Suhozasićena vodena para nakon izlaska iz kotla ulazi u turbinu gdje izentropski ekspanrira pri čemu proizvodi mehanički rad (a nadalje i električnu energiju).

4-1: Nakon izlaska iz turbine, nastala zasićena (mokra) para ulazi u kondenzator gdje se pri konstantnom tlaku hladi i kondenzira do stanja vrele kapljevine nakon čega je spremna za ulazak u pumpu i time je ciklus završen.

U svakom realnom Rankineovom ciklusu promjene stanja 1-2 i 3-4 nisu izentropske, već generiraju određeni iznos entropije, što uzrokuje smanjenje izlaznog rada turbine i povećanje uloženog rada za pumpu. To dovodi do smanjenja stupnja djelovanja cijelog procesa. Postoje također izvedbe Rankineovog ciklusa s pregrijačem pare kako bi se postigle više temperature radnog medija kako bi se poboljšao stupanj djelovanja cijelog procesa (vidjeti sliku 3.). [2]



Slika 3. Rankineov ciklus s pregrijačem pare [2]

3. NAČINI PRIKUPLJANJA SUNČEVE ENERGIJE

3.1. Parabolični kolektor (Parabolic trough collector)

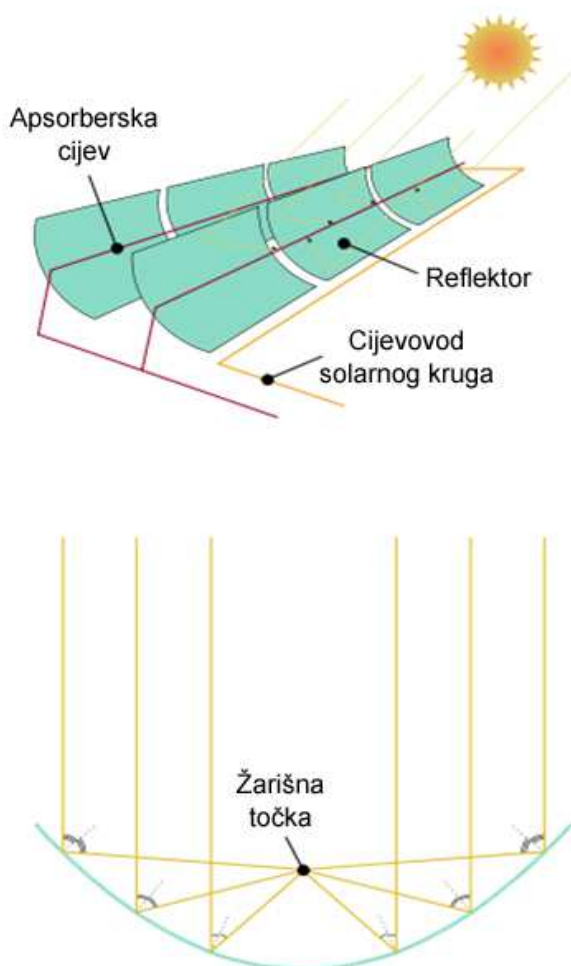
Parabolični kolektor (PTC) je vrsta sunčevog kolektora koji se koristi kod sunčevih termoelektrana. Konstruiran je kao parabolično zrcalo (obično prevučeno srebrom ili poliranim aluminijem), u čijem se žarištu nalazi Dewarova cijev ili vakumirano staklo, čime je moguće spriječiti toplinske gubitke kondukcijom i konvekcijom. Sunčeva svjetlost se odbija od paraboličnog zrcala, nakon čega se koncentrira u žarištu i radni medij (sintetičko ulje, rastopljena sol ili para pod tlakom) unutar vakuumirane staklene cijevi grije i do 400 °C. Parabolični kolektori imaju mnoge primjene, ali su prije svega namjenjeni za proizvodnju električne energije. [5]



Slika 4. Parabolični kolektori u sunčevoj termoelektrani [5]

3.1.1. Način rada PTC-a

Parabolični kolektori sastoje se od uzdužnog paraboličnog reflektora (dužine nekoliko stotina metara), koji fokusira direktnu komponentu Sunčevog zračenja, na žarišnu liniju, u kojoj je postavljen cilindrični apsorber (pogledati sliku 5.). Apsorber se sastoji od metalne cijevi, smještene u staklenom valjku, između kojih se nalazi vakuumski međuprostor, koji je tako konstruiran zbog smanjenja toplinskih gubitaka na višim radnim temperaturama. Stakleni valjak sprječava prodiranje prašine i stranih tijela u apsorber. Kroz metalnu cijev apsorbera struji radni fluid (sintetičko ulje, rastopljena sol ili para pod tlakom). Površina apsorbera je zaštićena selektivnim premazom, antirefleksnim premazom koji filtrira infracrveno zračenje te propušta svjetlost iz vidljivog dijela spektra. [5]



Slika 5. Prikaz rada sunčevog polja s PTC-ima te prikaz kako se paralelne Sunčeve zrake skupljaju u žarištu [5]

3.2. Fotonaponski paneli (Fotonaponski solarni sustavi)

Fotonapon (PV) je metoda generiranja električne struje koja se vrši pretvaranjem solarne radijacije u istosmjernu struju pomoću poluvodiča koji se izlažu fotonaponskom efektu. Fotonaponsko generiranje struje iskorištava solarne panele koji su sastavljeni od određenog broja solarnih ćelija koji sadržavaju fotonaponski materijal. Materijali koji se trenutno koriste za fotonaponski efekt uključuju monokristalni silicij (mono-Si), polikristalni silicij, amorfni silicij (a-Si), kadmijev telurid (CdTe) te mnogi drugi. Unatoč mnogim raspravama može li biti održiv izvor energije, fotonapon je treći najbitniji način dobivanja energije preko obnovljivih izvora (nakon energije vjetra i vode) po instaliranom kapacitetu u svijetu. [6]

Fotonaponski sustavi koriste solarne ćelije kako bi pretvorili sunčevo zračenje u elektricitet (kako je gore i rečeno). Sustav se sastoji od jednog ili više fotonaponskih panela, istosmjerno/izmjeničnog pretvarača struje (inverter - izmjenjivač), električnih međupoveznica i polica koje drže solarne panele. Mogu sadržavati još mnoge stvari koje mogu doprinijeti poboljšanju samog sustava ili davanju određenih informacija korisniku. [7] Princip rada je da tijekom dana fotonaponski sustav pretvara svjetlost u električnu energiju koja se može odmah koristiti ili akumulirati u baterije za upotrebu kada nema sunca (tijekom noći). [8]



Slika 6. Fotonaponska matrica sastavljena je od nekoliko solarnih ćelija [7]



Slika 7. Solarna ćelija [6]

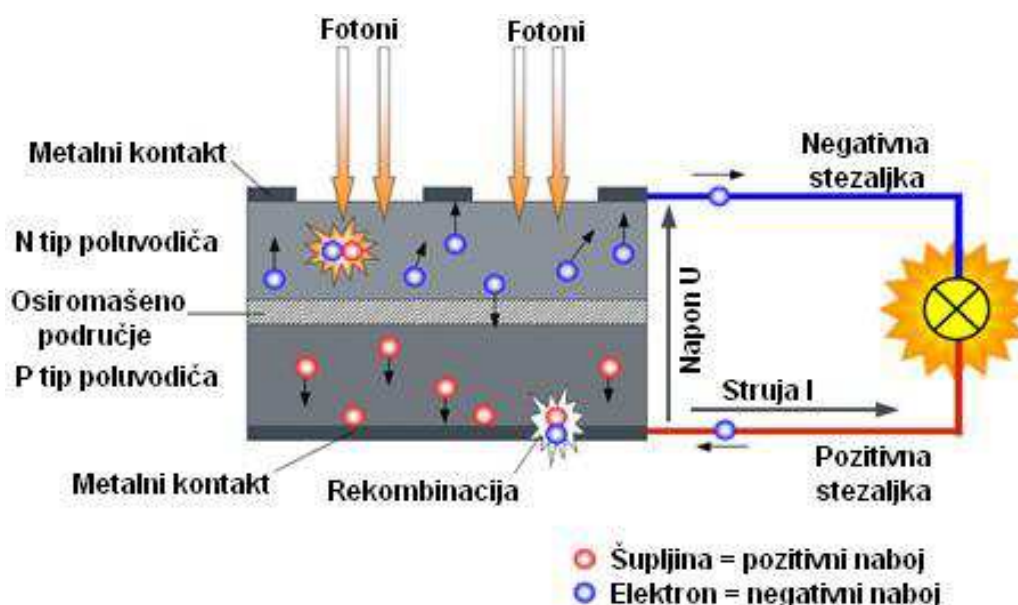


Slika 8. "Solar park" ili "PV park" [7]

3.2.2. Način rada PV panela

Jedna fotonaponska ($PV = Photo Voltaic$) ćelija sastoji se od dva ili više tankih slojeva poluvodičkog materijala (najčešće od silicija). Ispod silicija nalazi se tanki metalni vodljivi sloj. Kada se silicij izloži sunčevoj svjetlosti stvaraju se mali električni izboji koji se provode na metalni sloj kao istosmjerna struja (DC). Fotonaponski moduli će raditi i za vrijeme difuznog svjetla kada su oblačni dani, ali sa manje izlazne snage. [8]

Električni napon jedne ćelije je mali, stoga se pojedinačne ćelije spajaju zajedno i pakiraju u blokove, tj. module (odnosno "panele"). U svrhu zaštite ćelija, gornji sloj modula je najčešće zaštićen staklom. Fotonaponski moduli se međusobno spajaju u veće sustave te se tako izgrađuju PV sustavi bilo koje veličine. [8]



Slika 9. Fotoelektrična konverzija [8]

4. MATEMATIČKI MODEL RANKINEOVOG CIKLUSA

Prvotni zadatak bio je napraviti matematički model za 2 slučaja Rankineovog ciklusa: čisti ORC (čime je radni medij grijan samo suncem) te RC s vodom kao radnim medijem grijan kombinacijom sunca i plina. Kroz prvi model detaljno je objašnjen postupak, dok su u drugom modelu spomenute samo promjene u odnosu na prvi.

4.1. ORC

Za ORC postrojenje korištene su osnovne komponente koje čine Rankineov ciklus: pumpa, izmjenjivač (koji će poput kotla grijati radni medij), turbina i kondenzator. Kao radni medij odabran je R245fa čiji je kemijski naziv 1,1,1,3,3 - pentafluorpropan odnosno $C_3H_3F_5$. Odabran je iz jednostavnog razloga jer je jedan od poznatijih, isprobanih radnih medija do čijih se podataka može lako doći. Kao izvor topline odabrano je, naravno, Sunce. Cilj je u potpunosti zamijeniti fosilno gorivo i vidjeti kako će funkcionirati ORC uz pomoć samo sunčevog zračenja, tj. njezine insolacije. Kako bi se riješio problem načina zagrijavanja radnog medija, odabran je parabolični kolektor kroz koju prolazi cijev s termalnim uljem koji će na sebe primati sunčevu toplinu i predavati ju kasnije radnom mediju. Krajnji cilj bio je ispitati može li se takvo što postići i kakvi će biti izlazni podaci (izlazna snaga na turbini, stupanj djelovanja procesa itd.).

S obzirom da nisu bili zadani nikakvi ulazni podaci krenuto je s pretpostavkom do kojih temperatura se može zagrijati termalno ulje i kojom će uspješnošću prenijeti toplinu na radni medij. Stoga je napravljen mali potprogram u VBA-u unutar Excela koji je izvršavao simulaciju protusmjernog izmjenjivača. Prije toga će biti objašnjeno što je to uopće VBA.

Visual Basic (VBA) je programski jezik kojeg je razvila tvrtka Microsoft i on je programski jezik za programiranje radnji (event drive) kao i radno sučelje (development environment). Visual Basic je jako popularan kao programski jezik jer vuče korijene iz BASIC-a, jednog od najpopularnijih programskih jezika tokom 80-tih i on je osnovni programski jezik na kojemu su stvorene mnoge Microsoft aplikacije: Microsoft Word, Microsoft Excel i Microsoft PowerPoint.

Uneseni su ulazni podaci (ulazna temperatura ulja i radnog medija, početni pretpostavljeni protoci) kako bi se vidjelo može li se pravilno izvršiti izmjena topline, a da se dođe do željenih temperatura. Uz nekoliko pokušaja postavljanja radnih parametara, iteracija i drugih stvari uspjelo se doći do približnog cilja (promjene agregatnog stanja radnog medija) gdje je pretpostavljena ulazna temperatura ulja od 230°C te ulazna temperatura radnog medija od oko 35°C uz pretpostavljene im tlakove. Prilagodбом površine izmjenjivača A i koeficijenta prolaza topline k dobiven je dijagram ovisnosti temperature i površine dan na slici 10. Što je veća površina izmjenjivača, bit će moguća veća izmjena topline. Dobivenim podacima za R245fa (ulazna temperatura (nakon prolaska kroz pumpu) i izlazna temperatura (prije ulaska u turbinu)), lako se moglo doći do ostalih ključnih točaka i stanja radnog medija u ORC-u.

Ulazni (pretpostavljeni) podaci:

$$k = 0,4 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$A = 1000 \text{ m}^2$$

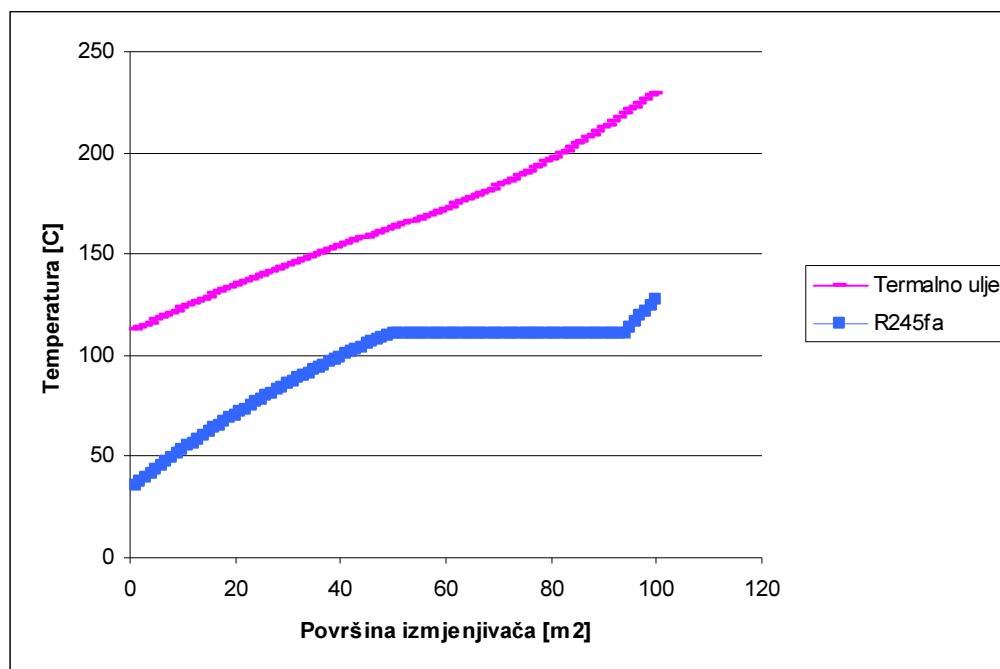
$$T_{ul,ulja} = 230^\circ\text{C}$$

$$T_{ul,RM} = 35^\circ\text{C}$$

$$p_{ulja} = 1 \text{ bar}$$

$$p_{RM} = 16 \text{ bar}$$

Za toplinski kapacitet termalnog ulja uzet je prosječni toplinski kapacitet između dvaju krajnjih temperatura ulja čiji su podaci saznani od strane proizvođača navedenog u literaturi (2,4kJ/kgK).



Slika 10. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača ulje - R245fa (primjer)

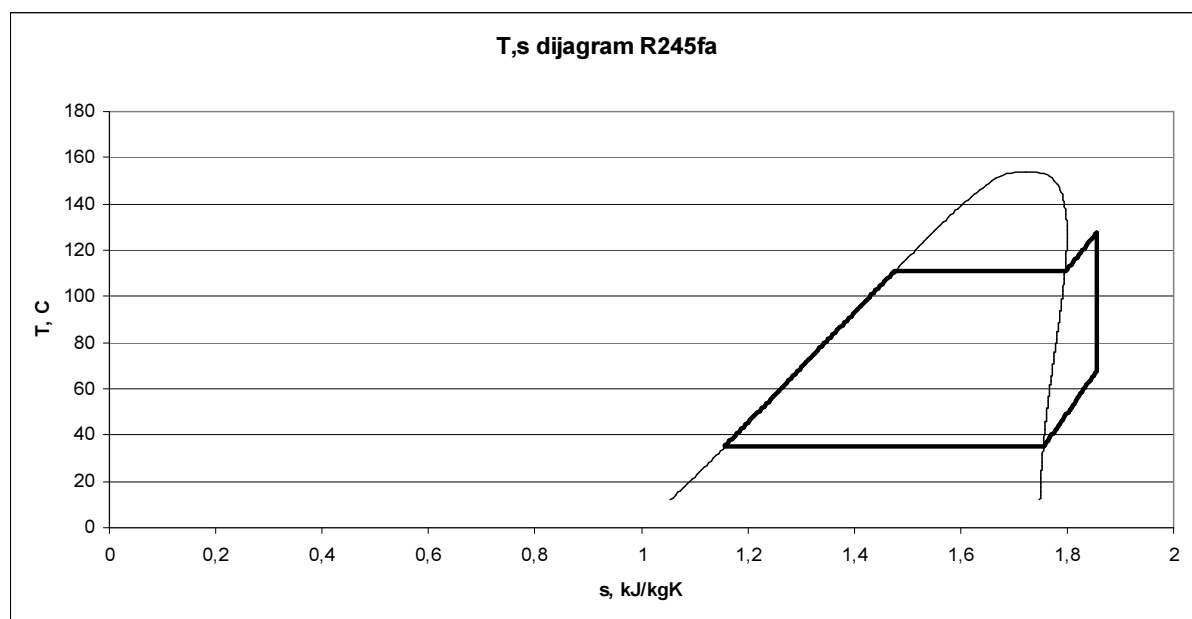
Kako bi se dobila numerička simulacija ORC postrojenja i dijagram, potrebno je bilo napraviti potprogram koji će uzeti podatke dobivene iz izmjenjivača i izračunati ključne točke i procese. Uz to je bio potreban dodatan program pod nazivom REFPROP koji u sebi sadrži veliku količinu podataka (toplinske tablice) ne samo za vodu već i mnogo drugih medija. REFPROP radi na principu da, kada se integrira unutar Excela i postavi naredba, uz pomoć jednog ili 2 ulazna podatka te naziva fluida daje treći potreban podatak ovisno o tome što tražimo.

Primjer naredbe i linije koda u VBA-u za REFPROP:

```
s(2) = Entropy("R245fa", "TP", "C", T(2), p(2))
```

Recimo da se želi iz zadane temperature i tlaka pentafluoropropana doći do iznosa entropije. Prvo će biti postavljena veličina koja je tražena, a zatim 5 ulaznih podataka koji će se nalaziti u zagradi: ime fluida, oznaka unosa podataka (u ovom slučaju temperatura i tlak), standardizacija (SI sustav), vrijednost temperature i vrijednost tlaka.) REFPROP će zatim za zadane uvjete izbaciti entropiju radnog medija. Kao što se može vidjeti, REFPROP je dosta praktičan i lagano se može doći do podataka. Radni medij će nadalje biti označavan kao RM.

S obzirom na poznatu izlaznu temperaturu RM iz pumpe (ulazna temp. u izmjenjivač) uz pretpostavku (radi jednostavnosti) da su procesi u turbini i pumpi izentropski, relativno lako se može doći do stanja RM-a prije ulaska u pumpu poznavajući entropiju (jednake prije i poslije pumpe), stoga je bilo potrebno samo spustiti liniju okomito dok ne dođe do Gibbsove krivulje zasićenja ($x=0$), gdje je očitana temperatura, entalpija pa čak i tlak. Automatski, time je dobiveno koji je tlak kondenzacije, dok je tlak isparavanja RM-a poznat iz podataka o izmjenjivaču. S obzirom da se preko izmjenjivača saznalo do kojeg stanja se zagrijava RM koji zatim ulazi u turbinu, lako se došlo i do ostalih detalja (stanje prije turbine, stanje poslije turbine i stanje u kondenzatoru). Simulacija ORC-a uz zadane podatke iz slike 10. izgledat će ovako na slici 11.



Slika 11. T-s dijagram ORC-a s R245fa

4.2. RC s vodom

Sličnim načinom kako je rađeno za ORC postrojenje primjenjeno je i u slučaju RC postrojenja s vodom kao radnim medijem. S obzirom na složeniju situaciju (predgrijavanje sunčevom energijom te zatim dogrijavanje prirodnim plinom), potrebno je bilo izvršiti simulaciju dvaju situacija: izmjenu topline između ulja i vode te izmjenu topline između plina i vode. To je izvršeno pomoću dva izmjenjivača gdje je prvi grijao RM do određene temperature koliko je maksimalno mogao (uljem) te drugi koji je nastavio grijati RM do zadane temperature (plinom). U ovom slučaju također su korišteni parabolični kolektori. Problem je bio do koje će temperature uspjeti termalno ulje zagrijati vodu jer se radni parametri vode prije ulaska u turbinu mogu kretati i oko 500°C i više (kolektori griju medij do 400°C najviše). Zbog toga je potreban plin koji će nadomjestiti još to malo (ili više) topline potrebne za grijanje vode. Uz pomoć REFPROP-a i napisanog potprograma na sličan način dobivene su radne točke kao i u RC-u. Na slikama 12., 13., i 14. može se vidjeti uz zadane pretpostavljene parametre kako izgledaju izmjene topline u izmjenjivaču i za te podatke simulacija RC postrojenja i dijagram. Radi jednostavnosti i lakše usporedbe, pretpostavljeni su i uzeti isti ulazni podaci za ulje i vodu. Izmjenjivač će biti veće površine, a jedinu razliku čine početni podaci za plin koji su dani dolje.

Ulazni (pretpostavljeni) podaci:

$$k = 0,4 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$A_{ulje-voda} = 1000 \text{ m}^2, \quad A_{plin-voda} = 2000 \text{ m}^2$$

$$T_{ul,ulja} = 230^\circ\text{C}$$

$$T_{ul,plina} = 1000^\circ\text{C}$$

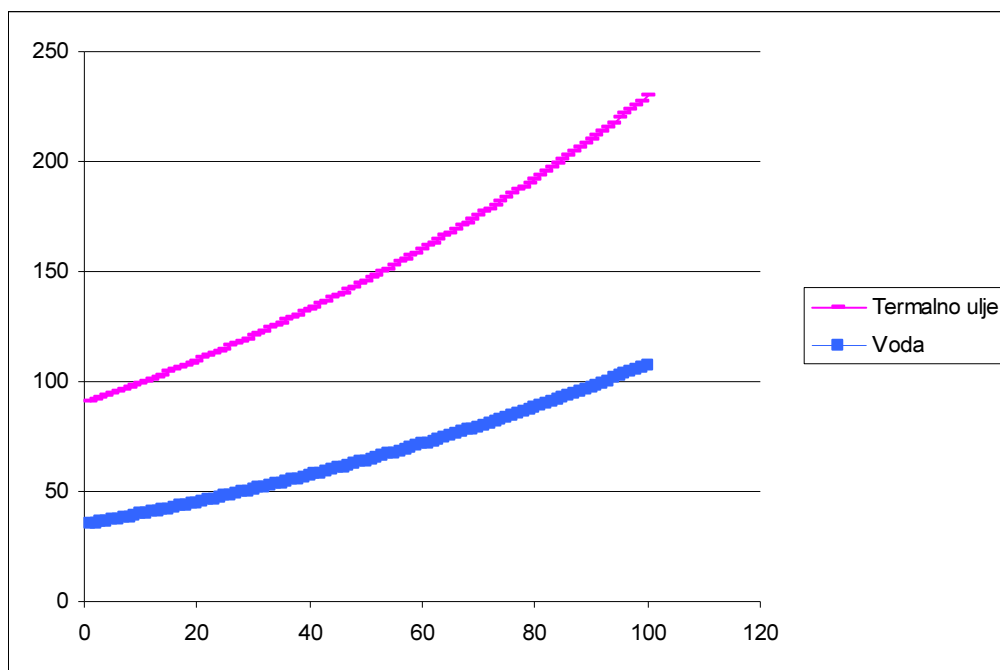
$$T_{ul,RM} = 35^\circ\text{C}$$

$$p_{plin} = p_{ulja} = 1 \text{ bar}$$

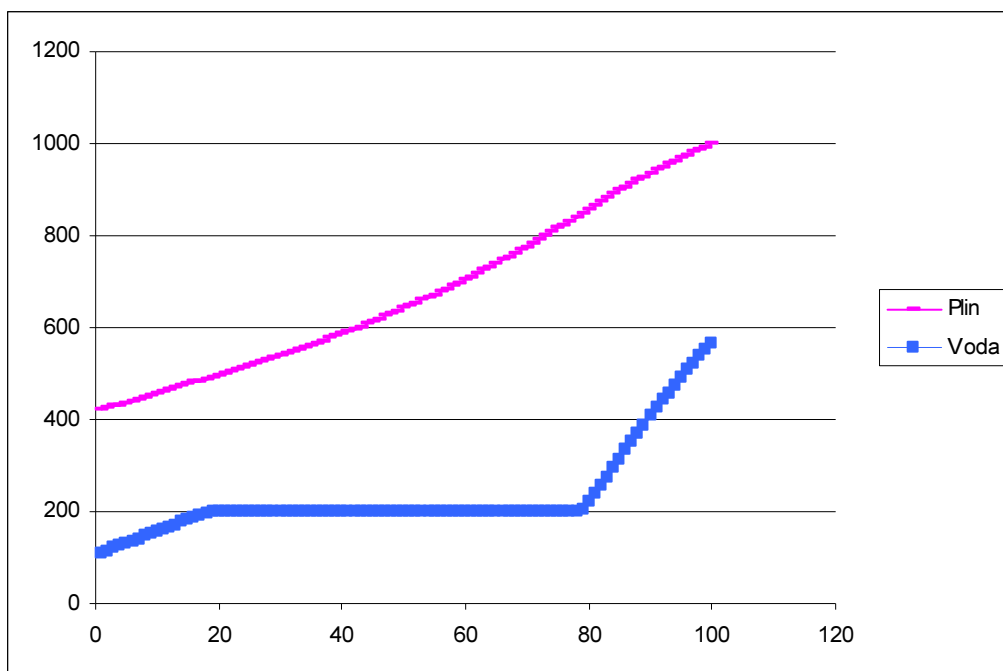
$$p_{RM} = 16 \text{ bar}$$

Za specifični toplinski kapacitet termalnog ulja uzet je prosječni toplinski kapacitet između dvaju krajnjih temperatura ulja čiji su podaci saznani od strane proizvođača navedenog u literaturi ($2,4\text{kJ/kgK}$).

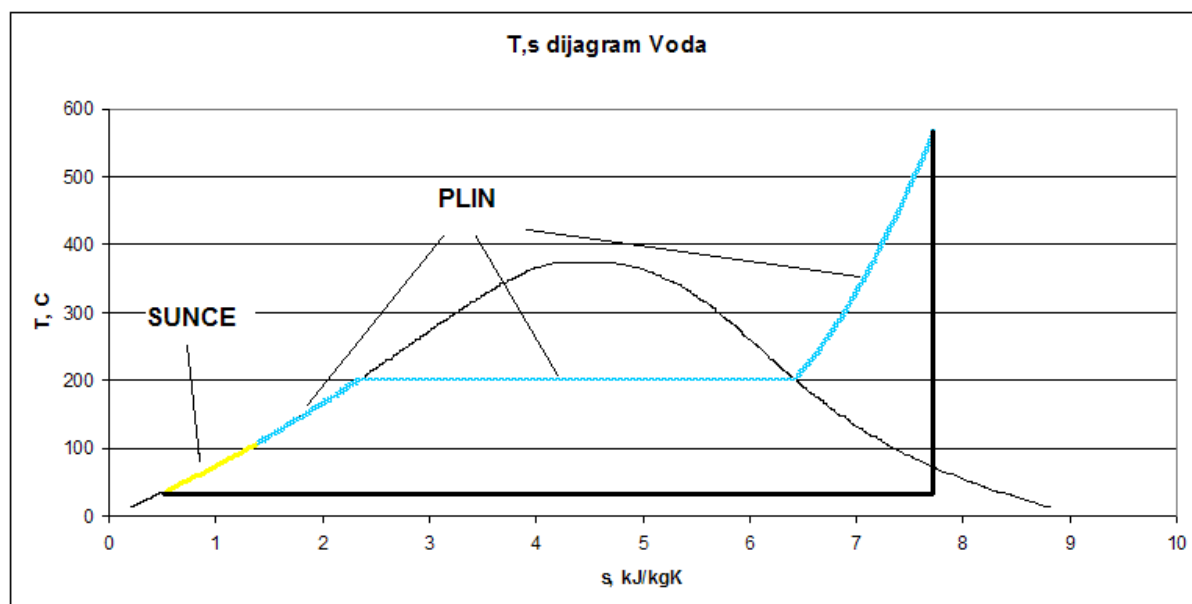
Za specifični toplinski kapacitet plina uzet je prosječni toplinski kapacitet između dvaju krajnjih temperatura plina ($1,2\text{kJ/kgK}$). Pod plin se smatraju dimni plinovi.



Slika 12. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača ulje - voda (primjer)



Slika 13. T-A dijagram protusmjernog izmjenjivača plin - voda (primjer)



Slika 14. T-s dijagram RC-a s vodom

Treba primijetiti da u ovom slučaju sunce slabo zagrijava (žuta linija) dok plin preuzima veći dio grijanja (plava linija).

4.3. Postavljanje problema

S obzirom na raznolikost načina dobivanja topline za zagrijavanje radnog medija te da nisu strogo zadani ulazni podaci, potrebno je bilo postavljanje neke referentne vrijednosti kako bi bila moguća usporedba ORC s RC postrojenjem te njih zajedno s fotonaponskim sustavom. Kao referentna veza između njih, postavljeno je da izlazna snaga na turbini mora kroz godinu dana prosječno po satu iznositi 1 MW, tj. 1000 kW. Drugim riječima, cilj je u sva tri postrojenja dobiti kroz godinu dana $365 \text{ dana} \cdot 24 \text{ h} \cdot 1000 \text{ kW} = 8.760.000 \text{ kW}$. S obzirom na način izbora zagrijavanja radnog medija, uvjete vezane uz mogućnost zagrijavanja, trenutnu insolaciju itd. rezultati će biti raznoliki čime će se dobiti prividna slika koja će pokazivati što će se događati tijekom godine. U nekim razdobljima dobivena energija iznositi će puno manje, a u nekim puno više ako je ovisnost samo o suncu, dok će uravnoteženo biti kod slučaja sa sunčevom energijom i dodatnim grijanjem plinom.

U daljnjem poglavlju bit će opisan pristup i način izračunavanja za sva tri postrojenja.

5. SATNA SIMULACIJA GODIŠNJEG POGONA POSTROJENJA

Kako bi nastala satna simulacija godišnjeg pogona postrojenja, bilo je potrebno doći do podataka o sunčevoj insolaciji, kako to utječe na temperaturu radnog medija, protok radnog medija itd. S obzirom na komplikacije i nemogućnost pronalaska određenih podataka problemu se moralo prići na jednostavniji način što je povuklo za sobom jednostavniji proračun. Dobivanjem podataka za sunčevu insolaciju tijekom svakog sata u danu unutar godine dana stvoren je glavni oslonac za daljnji rad.

Uz pomoć programa te mjerenjima insolacije (koji su dani od strane znanstvenog novaka), dobiveni su podaci za svaki sat u godini koliko je iznosila insolacija (vidjeti sliku 1.) čime su se relativno lagano mogli uspoređivati hladniji i topliji dani, računati toplina dobivena od sunca, potrebna toplina za nadoknađivanje itd.

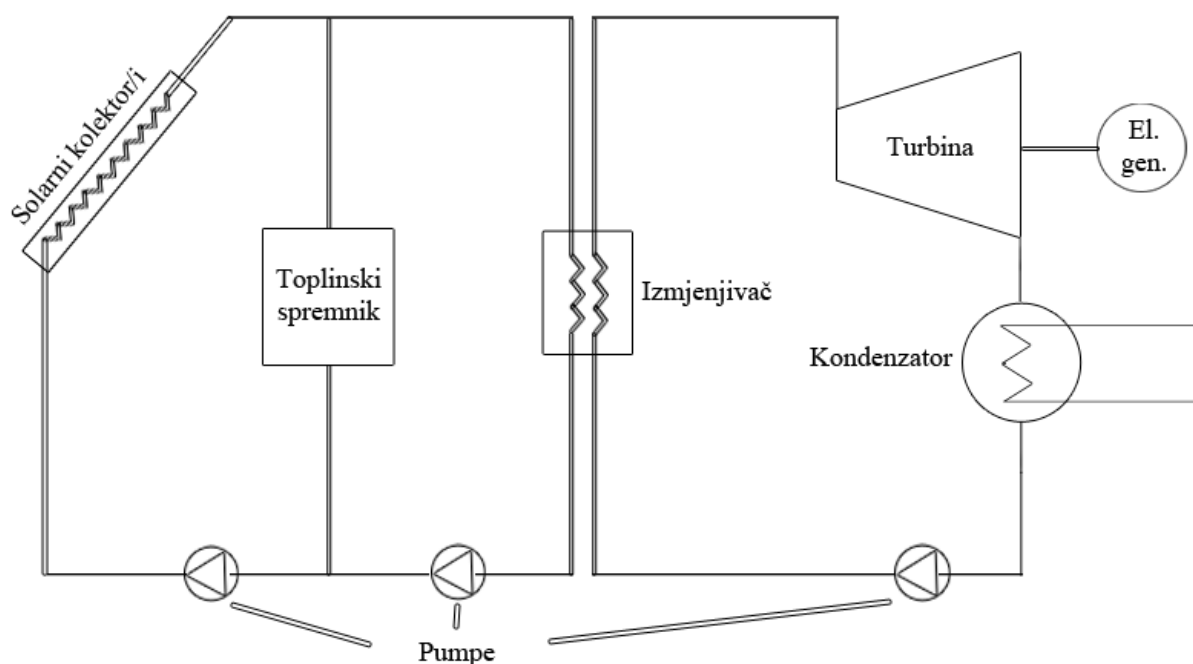
Rezultati su dobiveni napisanim potprogramom koji je izvrtio sve podatke o insolaciji i prema danim uvjetima izbacio podatke koji su kasnije uvršteni u dijagram radi vizualne predodžbe. Jedan od danih uvjeta bio je da postrojenja trebaju proizvesti 8.760.000 kW izlazne snage u godini dana, što bi bilo prosječno 1000 kW po satu. Naravno, takav idealan slučaj neće biti moguć u svim postrojenjima pa će biti različitih peakova (recimo ORC) stoga ćemo prilagoditi konstantnost na dnevnoj bazi, ali će i dalje ukupna izlazna snaga nakon godine dana biti jednaka.

Treba napomenuti da je za svaki sat uzet isti stupanj korisnosti postrojenja. Razlog tome je što nema dovoljno podataka i potrebno je oslanjati se na pretpostavljene uvjete koji će svaki sat biti jednaki. Uz iste pretpostavljene temperature i tlakove, stupanj korisnosti (stupanj djelovanja) će kroz svaki sat ostati jednak. Realno je to jako teško dostizivo, ali uz trenutne podatke bit će ostavljena takva pretpostavka. Detaljnije o tome bit će napisano u svakom poglavlju ovisno o kakvom se tipu postrojenja radi.

	A	B	C	D	E
1	Mjesec	Datum	Sati	Sati uk.	Insolacija [W/m2]
2	1	1	1	1	0
3	1	1	2	2	0
4	1	1	3	3	0
5	1	1	4	4	0
6	1	1	5	5	0
7	1	1	6	6	0
8	1	1	7	7	0
9	1	1	8	8	0
10	1	1	9	9	48
11	1	1	10	10	109
12	1	1	11	11	165
13	1	1	12	12	258
14	1	1	13	13	269
15	1	1	14	14	168
16	1	1	15	15	98
17	1	1	16	16	59
18	1	1	17	17	0
19	1	1	18	18	0
20	1	1	19	19	0
21	1	1	20	20	0
22	1	1	21	21	0
23	1	1	22	22	0
24	1	1	23	23	0
25	1	1	24	24	0

Slika 15. Sunčeva insolacija kroz 1. siječnja unutar 24 sata

5.1. Satna simulacija postrojenja s organskim radnim medijem



Slika 16. Shema ORC postrojenja sa solarnim kolektorima

U svrhu dobivanja podataka, za početak je bilo potrebno saznati koja će to površina kolektora biti dovoljna za postizanje izlazne snage. Postupak slijedi dolje.

Cilj: 8.760.000 kW u godini dana izlazne snage, prosjek 1.000 kW po satu

Zbrajanje svih insolacija po satu kako bi došli do ukupne insolacije tijekom godine dana:

$$q_{ins,uk} = q_{ins1} + q_{ins2} + q_{ins3} + q_{ins4} + \dots + q_{ins8760}$$

Ukupna toplina tijekom godine dana bit će jednaka umnošku insolacije i površine kolektora:

$$Q_{ulož,uk} = q_{ins,uk} \cdot A_{kol}$$

Pretpostavlja se uvijek isti stupanj djelovanja procesa tijekom godine (objašnjeno u uvodu ovog poglavlja):

$$\eta = P_{t,uk} / Q_{ulož,uk}$$

Kombinacijom formula dobiva se pretpostavljena površina kolektora:

$$A_{kol} = P_{t,uk} / (q_{ins,uk} \cdot \eta)$$

Pošto se radi o ORC procesu, stupanj djelovanja takvog postrojenja kreće se oko 15-20%. Uz zadane početne uvjete i stvoren matematički model koji omogućuje prihvatljiv rad procesa uz parabolične kolektore dobiven je stupanj djelovanja od oko 15,51% (tj. 0,1550879). Uz $P_{t,uk} = 8.760.000$ kW i izračunatu godišnju insolaciju od $1210,119$ kW/m² (preko danih mjerenja), potrebna površina kolektorskog zrcala iznosit će oko $46.676,48$ m².

Prema podacima o različitim markama paraboličnih kolektora i njihovim dimenzijama (koje se skoro pa neznatno razlikuju), odabran je kolektor Flagsol SKAL-ET 150 s dimenzijama zrcala (koje obuhvaćaju sunčeve zrake) 12 m x $5,77$ m. [12] Uz te veličine, dijeljenjem ukupne potrebne površine zrcala s površinom jednog zrcala dobije se da je potrebno skoro 676 takvih zrcala. To znači da će biti zauzeta površina u kojoj će biti raspoređeno 26×26 zrcala (kvadratno slaganje, tj. paralelno). Uz tako velike brojke i površine postavlja se pitanje da li je takvo što uopće isplativo (možda i izvedivo za ove uvjete postrojenja). Ovom problemu pridat će se više pažnje u tehnoekonomskej analizi.

Trebalo bi napomenuti da će sama površina na kojoj se nalaze kolektori biti puno veća zbog razmaka između redova zrcala. Razmaci između zrcala bitni su iz dva razloga: kako bi malo vozilo-cisterna koje se koristi za pranje zrcala (nepranjem pada efikasnost) moglo proći između redaka te kako bi bilo dovoljno prostora za zrcala koja se zakreću po uzdužnoj osi kako bi pratila kretanje sunca (ne smiju zrcala niti sjenom prekrivati jedno drugo).

S obzirom da će svaki dan u godini biti drugačija dostupnost sunca i insolacija, logično je da će se više struje proizvoditi ljeti, a manje zimi. Cilj je kroz dan dobiti konstantnu vrijednost izlazne snage kako postrojenje i turbina ne bi bili nepotrebno opterećeni. S obzirom da veći dio sati nema sunca, a struja se treba konstantno proizvoditi, potrebno je dio topline koji se dobije tijekom dana i sunčeve radijacije odvajati i spremati u toplinski spremnik kako bi se popunili "prazni" sati. Zbog toplinskih gubitaka, pogotovo za ovako malo postrojenje koje proizvodi prosječno po danu u godini 1 MW električne snage, preporučljivo je spremati toplinu u spremnik samo na dnevnoj bazi. Stoga će "prazni" sati biti pokriveni samo unutar jednog dana pomoću toplinskog spremnika.

Zbog danih uvjeta, postupak proračuna biti će ovakav:

- 1) izračunavanje topline koja se može dobiti preko kolektora za svaki sat u određenom danu
- 2) zbrajanje svih dobivenih toplina u tom danu kako bi se došlo do ukupne vrijednosti topline kroz jedan dan
- 3) ukupna toplina raspoređuje se ravnomjerno kroz 24 sata
- 4) ta toplina u jednom satu bit će uložena toplina u ciklusu preko koje je moguće dobiti izlaznu snagu električne energije (poznavajući stupanj korisnosti ciklusa)

Postavljanjem nekoliko rezultata kroz određene dane u godini pokušat će se donijeti opći zaključak.

Toplinski spremnik

Za izračun toplinskog spremnika potrebno je naći dan tijekom kojeg je pospremljeno najviše topline. Taj će podatak biti mjerodavan za optimalnu veličinu spremnika. Uz pomoć potprograma dobiva se podatak da je najviše topline pospremljeno 6. lipnja (najveći peakovi također). S obzirom da se toplina sprema preko termalnog (tipičnog bijelog) ulja, lagano se može doći do volumena ulja i maksimalnog kapaciteta spremnika.

Izračunavanjem Q_{pospr} čija je mjerna jedinica u kWh, potrebno je pomnožiti s 3600 kako bi se dobila toplinska energija u spremniku Q_{spr} izražena u kJ. Zatim će se pomoću jednostavne termodinamičke formule:

$$Q_{spr} = \rho_{ulja} \cdot V_{ulja} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

(ρ_{ulja} - gustoća ulja, c_p - specifični toplinski kapacitet ulja, ΔT - razlika temperatura ulja)

dobiti volumen ulja, a time i unutarnji volumen spremnika koji bi bio spreman za svaki dan u godini. Razlika temperatura ulja su razlika između ulazne i izlazne temperature ulja u izmjenjivaču (230°C i 112°C). Gustoća i toplinski kapacitet uzeti su kao prosječna vrijednost između ovih dvaju temperatura.

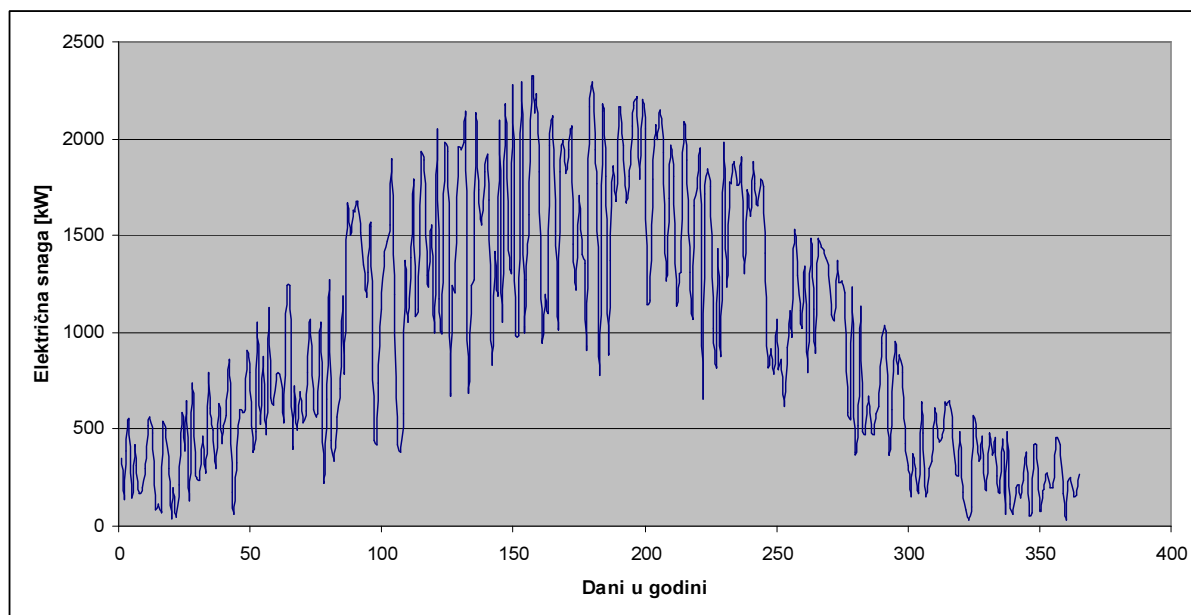
Unutarnji volumen spremnika prema tim parametrima iznosit će 2680 m³. Spremnik takve veličine geometrijski bi trebao izgledati poput cilindra. Prema formuli za volumen cilindra i uz pretpostavku da je visina jednaka polumjeru baze cilindra (radi lakšeg proračuna) lako se dobije da polumjer i visina iznose 9,5 m. Zbog sigurnosnih razloga, a i mogućeg viška prostora za svaki slučaj polumjer i visina iznosile bi 10 m. Naravno, na sam spremnik postavlja se vanjska izolacija pa bi ukupna veličina spremnika bila nešto veća. S obzirom na relativno visoke temperature ulja i hladne dane, vrlo je vjerojatno da će biti podzemne izvedbe.

Mjesec	Datum	Sati	Sati uk.	Insolacija [W/m ²]	Toplina [kW]	Korištena toplina [kW]	El. snaga [kW]
1	1	1	1	0	0	2283,258	354,106
1	1	2	2	0	0	2283,258	354,106
1	1	3	3	0	0	2283,258	354,106
1	1	4	4	0	0	2283,258	354,106
1	1	5	5	0	0	2283,258	354,106
1	1	6	6	0	0	2283,258	354,106
1	1	7	7	0	0	2283,258	354,106
1	1	8	8	0	0	2283,258	354,106
1	1	9	9	48	2240,47088	2283,258	354,106
1	1	10	10	109	5087,73595	2283,258	354,106
1	1	11	11	165	7701,61863	2283,258	354,106
1	1	12	12	258	12042,531	2283,258	354,106
1	1	13	13	269	12555,9722	2283,258	354,106
1	1	14	14	168	7841,64806	2283,258	354,106
1	1	15	15	98	4574,2947	2283,258	354,106
1	1	16	16	59	2753,91212	2283,258	354,106
1	1	17	17	0	0	2283,258	354,106
1	1	18	18	0	0	2283,258	354,106
1	1	19	19	0	0	2283,258	354,106
1	1	20	20	0	0	2283,258	354,106
1	1	21	21	0	0	2283,258	354,106
1	1	22	22	0	0	2283,258	354,106
1	1	23	23	0	0	2283,258	354,106
1	1	24	24	0	0	2283,258	354,106

Slika 17. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (1)

7	3	1	4393	0	0	13792,899	2139,112
7	3	2	4394	0	0	13792,899	2139,112
7	3	3	4395	0	0	13792,899	2139,112
7	3	4	4396	0	0	13792,899	2139,112
7	3	5	4397	18	840,176578	13792,899	2139,112
7	3	6	4398	121	5647,85366	13792,899	2139,112
7	3	7	4399	210	9802,06008	13792,899	2139,112
7	3	8	4400	434	20257,5908	13792,899	2139,112
7	3	9	4401	607	28332,6213	13792,899	2139,112
7	3	10	4402	729	34027,1514	13792,899	2139,112
7	3	11	4403	793	37014,4459	13792,899	2139,112
7	3	12	4404	738	34447,2397	13792,899	2139,112
7	3	13	4405	757	35334,0928	13792,899	2139,112
7	3	14	4406	806	37621,2401	13792,899	2139,112
7	3	15	4407	651	30386,3862	13792,899	2139,112
7	3	16	4408	503	23478,2677	13792,899	2139,112
7	3	17	4409	376	17550,3552	13792,899	2139,112
7	3	18	4410	229	10688,9131	13792,899	2139,112
7	3	19	4411	111	5181,0889	13792,899	2139,112
7	3	20	4412	9	420,088289	13792,899	2139,112
7	3	21	4413	0	0	13792,899	2139,112
7	3	22	4414	0	0	13792,899	2139,112
7	3	23	4415	0	0	13792,899	2139,112
7	3	24	4416	0	0	13792,899	2139,112

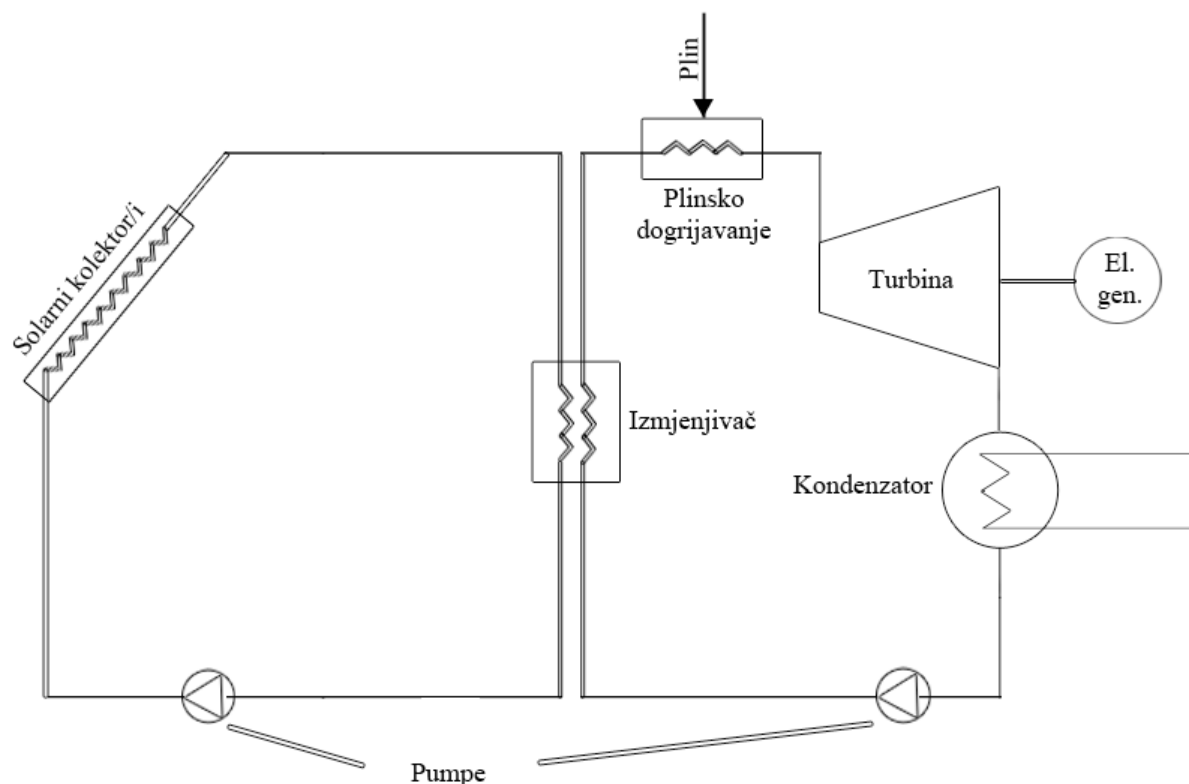
Slika 18. Proračun dobivanja el. snage kroz 3. srpnja (1)



Slika 19. Dobivena električna snaga kroz dane u godini (1)

Nakon očitavanja dnevnih prosječnih vrijednosti el. snage, koje su dobivene ravnomjernim raspoređivanjem topline kroz svaki sat pomoću toplinskog spremnika (npr. za 3.7. ravnomjerno je dobiveno 2139,11 kW el. energije svaki sat), vrijednosti za svaki dan postavljene su u jedan dijagram (slika 19.). Da se ne radi o dnevnom spremniku nego o tjednom ili sezonskom, krivulja bi bila mnogo uravnoteženija i ne bi toliko oscilirala. Ono što se može vidjeti jest da je najviše snage dobiveno sredinom godine dakle prije, za vrijeme i poslije ljeta. Najmanje snage je očekivano dobiveno na početku i kraju godine tijekom zime kad je najmanja insolacija i najkraće traje dan.

5.2. Satna simulacija postrojenja s vodom kao radnim medijem



Slika 20. Shema RC postrojenja s vodom sa solarnim kolektorima i dodatnim grijanjem plinom

U svrhu dobivanja podataka, za početak je bilo potrebno saznati koja će to površina kolektora biti dovoljna za postizanje izlazne snage. Postupak slijedi dolje.

Cilj: 8.760.000 kW u godini dana izlazne snage, prosjek 1.000 kW po satu

S obzirom na konstantni stupanj djelovanja te konstantnu izlaznu snagu iz turbine svaki sat (budući da je medij grijan sunčevom energijom, a onda potrebni ostatak nadopunjen plinom), logično je da će i uložena snaga svaki sat biti konstantna.

Uložena snaga sastoji se od topline koju predaje plin radnom mediju i topline koju predaje sunce preko kolektora:

$$Q_{ulož} = Q_{plin} + q_{ins} \cdot A_{kol}$$

Stupanj djelovanja procesa:

$$\eta = P_t / Q_{ulož}$$

Cilj je saznati koja bi to površina kolektora trebala da se na dan kada je najveća insolacija u potpunosti zadovolji potrebna snaga koju treba uložiti:

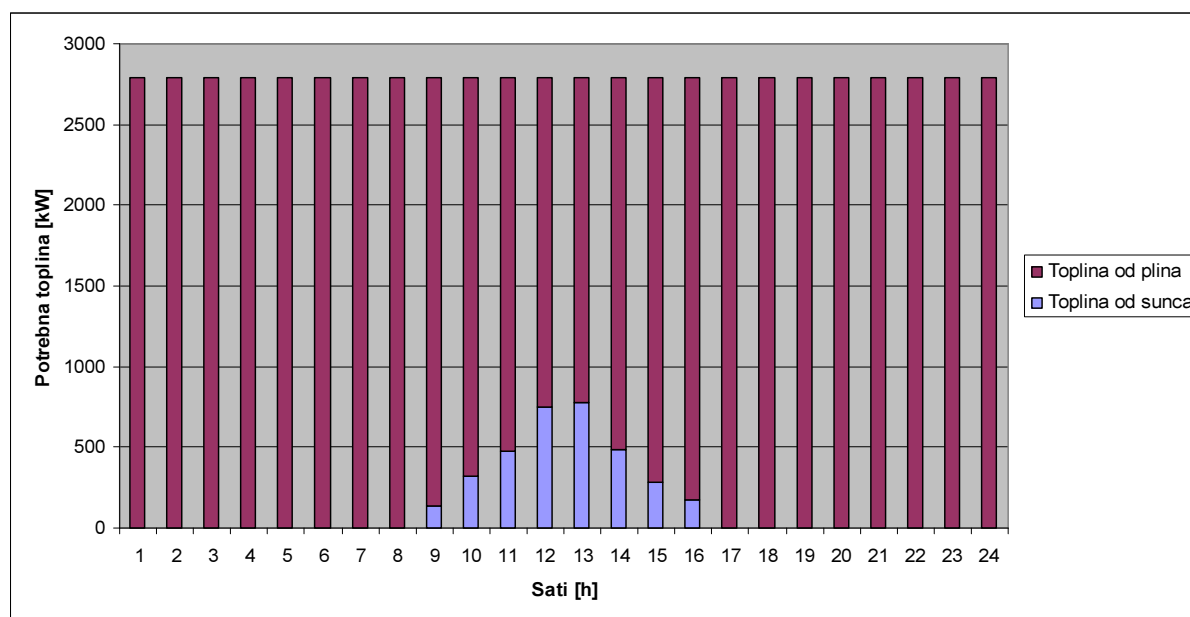
$$Q_{plin} = 0 \rightarrow A_{kol,max} = P_t / (q_{ins,max} \cdot \eta)$$

Pošto se radi o RC procesu s vodom, stupanj djelovanja kretat će se oko 30-40%. Uz zadane početne uvjete i stvoren matematički model koji omogućuje prihvatljiv rad procesa uz parabolične kolektore dobiven je stupanj djelovanja od oko 35,91% (tj. 0,3590535) . Uz konstantnu snagu $P_t = 1.000 \text{ kW}$ te traženjem dana i sata kada je najveća insolacija (8. srpnja, 13:00 h, 961 W/m^2) dobit će se maksimalna potrebna površina kolektora potrebna da dovede toplinu RM-u i izbací potrebnu električnu snagu. Ta površina iznosí će oko 2900 m^2 .

Pregledom dobivenih rezultata kroz nekoliko određenih dana u godini te dijagrama odnosa topline dane plinom i topline dane suncem moguće je doći do nekih zaključaka.

Mjesec	Datum	Sati	Sati uk.	Insolacija [W/m ²]	Toplina preko sunca [kW]	Toplina preko plina [kW]	El. snaga [kW]
1	1	1	1	0	0	2785,100478	1000
1	1	2	2	0	0	2785,100478	1000
1	1	3	3	0	0	2785,100478	1000
1	1	4	4	0	0	2785,100478	1000
1	1	5	5	0	0	2785,100478	1000
1	1	6	6	0	0	2785,100478	1000
1	1	7	7	0	0	2785,100478	1000
1	1	8	8	0	0	2785,100478	1000
1	1	9	9	48	139,2	2645,900478	1000
1	1	10	10	109	316,1	2469,000478	1000
1	1	11	11	165	478,5	2306,600478	1000
1	1	12	12	258	748,2	2036,900478	1000
1	1	13	13	269	780,1	2005,000478	1000
1	1	14	14	168	487,2	2297,900478	1000
1	1	15	15	98	284,2	2500,900478	1000
1	1	16	16	59	171,1	2614,000478	1000
1	1	17	17	0	0	2785,100478	1000
1	1	18	18	0	0	2785,100478	1000
1	1	19	19	0	0	2785,100478	1000
1	1	20	20	0	0	2785,100478	1000
1	1	21	21	0	0	2785,100478	1000
1	1	22	22	0	0	2785,100478	1000
1	1	23	23	0	0	2785,100478	1000
1	1	24	24	0	0	2785,100478	1000

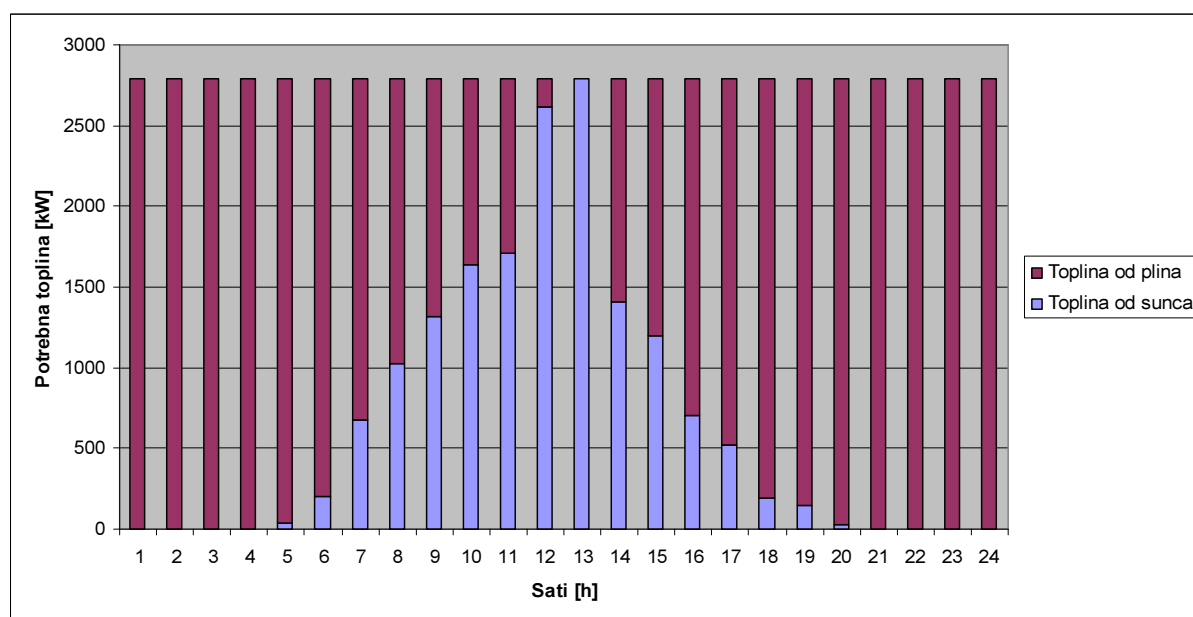
Slika 21. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (2)



Slika 22. Dijagram dobivenih toplina od sunca i plina kroz 1. siječnja (2)

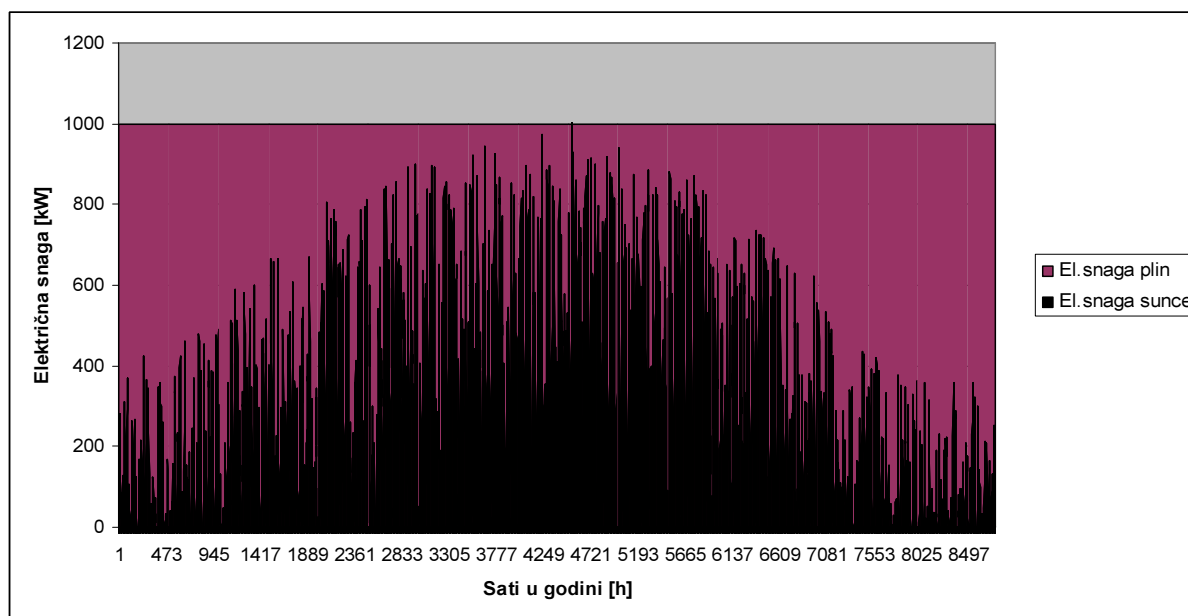
7	8	1	4513	0	0	2785,100478	1000
7	8	2	4514	0	0	2785,100478	1000
7	8	3	4515	0	0	2785,100478	1000
7	8	4	4516	0	0	2785,100478	1000
7	8	5	4517	14	40,6	2744,500478	1000
7	8	6	4518	70	203	2582,100478	1000
7	8	7	4519	234	678,6	2106,500478	1000
7	8	8	4520	353	1023,7	1761,400478	1000
7	8	9	4521	453	1313,7	1471,400478	1000
7	8	10	4522	566	1641,4	1143,700478	1000
7	8	11	4523	590	1711	1074,100478	1000
7	8	12	4524	903	2618,7	166,4004782	1000
7	8	13	4525	961	2786,9	0	1000,646125
7	8	14	4526	487	1412,3	1372,800478	1000
7	8	15	4527	413	1197,7	1587,400478	1000
7	8	16	4528	244	707,6	2077,500478	1000
7	8	17	4529	179	519,1	2266,000478	1000
7	8	18	4530	65	188,5	2596,600478	1000
7	8	19	4531	50	145	2640,100478	1000
7	8	20	4532	11	31,9	2753,200478	1000
7	8	21	4533	0	0	2785,100478	1000
7	8	22	4534	0	0	2785,100478	1000
7	8	23	4535	0	0	2785,100478	1000
7	8	24	4536	0	0	2785,100478	1000

Slika 23. Proračun dobivanja el. snage kroz 8. srpnja (2)



Slika 24. Dijagram dobivenih toplina od sunca i plina kroz 8. srpnja (2)

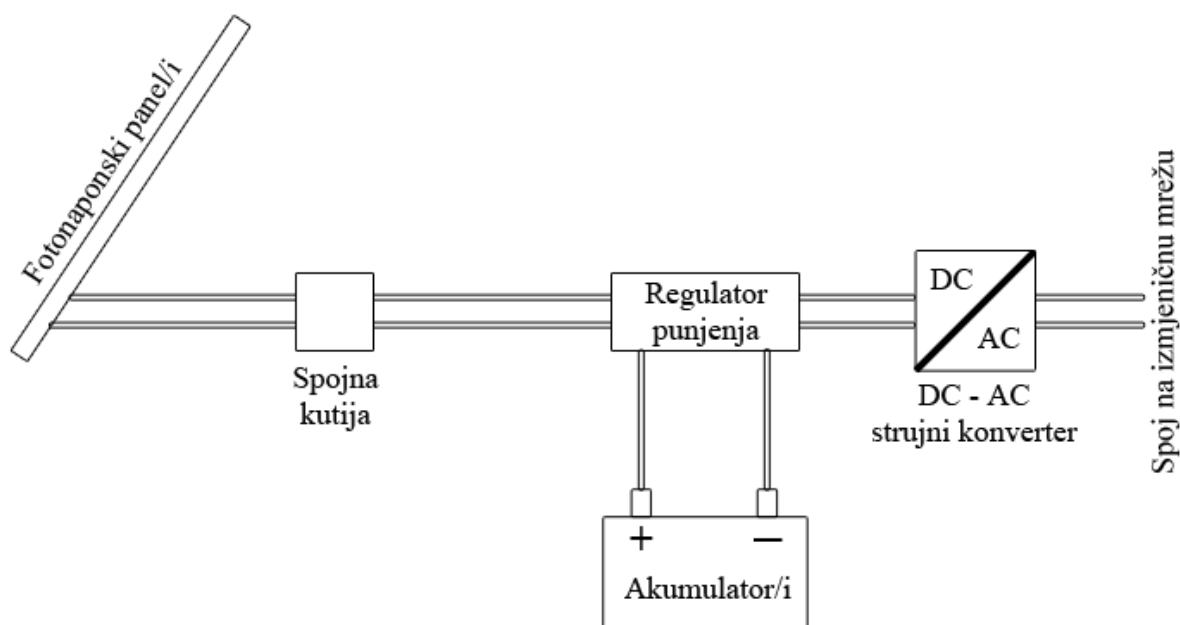
S obzirom da se ukupna toplina dobiva preko sunca i plina, moglo se lako prilagoditi da izlazna snaga (el. energija) bude konstantna u svakom satu i to točno 1000 kW. Nakon što bi bilo poznato koliko se topline dobiva od sunca, dodalo bi se još toliko plina koji bi dao topline taman toliko da njihova ukupna toplina pomnožena s korisnošću postrojenja daje 1000 kW. Zbog toga nam nije bio potreban toplinski spremnik jer bi se se manjak topline regulirao plinom koji bi se dodavao. Može se primjetiti da je 8. srpnja u 13 sati bila najveća insolacija u godini i da je točno u tom trenutku toplina od sunca sama pokrivala uloženu snagu za proces dok nije bilo potrebno grijanje radnog medija plinom.



Slika 25. Dobivena električna snaga kroz sate u godini (2)

Kao što se može vidjeti, električna snaga je tijekom godine konstantna što je lagano postići jer je nedostatak sunca nadomješten plinom pa su vrijednosti u ciklusu praktički konstantne. Kroz gornje dijagrame lako je vidljivo da je najmanje plina uloženo tijekom ljetnih dana, a najviše tijekom zimskih što je samo po sebi logično.

5.3. Satna simulacija fotonaponskog postrojenja



Slika 26. Shema fotonaponskog postrojenja

Proračun je sličan kao i kod organskog postrojenja s radnim medijem. Dok je tamo dobivena toplina preko kolektora i uložena u ORC uz poznati stupanj djelovanja, ovdje će postrojenje također imati uloženu toplinu (točnije dozračenu energiju) koja će biti direktno pretvorena u električnu struju s određenim stupnjem djelovanja samog fotonaponskog panela. Postupak slijedi dolje.

Cilj: 8.760.000 kW u godini dana izlazne snage, prosjek 1.000 kW po satu

Zbrajanje svih insolacija po satu kako bi došli do ukupne insolacije tijekom godine dana:

$$q_{ins,uk} = q_{ins1} + q_{ins2} + q_{ins3} + q_{ins4} + \dots + q_{ins8760}$$

Ukupna dozračena energija tijekom godine dana bit će jednaka umnošku insolacije i površine kolektora:

$$Q_{ulož,uk} = q_{ins,uk} \cdot A_{pan}$$

Pretpostavlja se uvijek isti stupanj djelovanja procesa tijekom godine (jer su to paneli):

$$\eta = P_{t,uk} / Q_{ulož,uk}$$

Kombinacijom formula dobiva se pretpostavljena površina kolektora:

$$A_{pan} = P_{t,uk} / (q_{ins,uk} \cdot \eta)$$

Pošto se radi o pretvaranju energije preko fotonaponskog sustava, treba znati da se stupanj djelovanja takve pretvorbe kreće oko 10-15%. Radi usporedbe i danog savjeta od strane asistenta, odabran je stupanj djelovanja od oko 10% (tj. 0,1) . Uz $P_{t,uk} = 8.760.000 \text{ kW}$ i izračunatu godišnju insolaciju od $1210,119 \text{ kW/m}^2$ (preko danih mjerenja), potrebna površina kolektora iznositi će oko $72.389,57 \text{ m}^2$.

S obzirom da će svaki dan u godini biti drugačija dostupnost sunca i insolacija, logično je da će se više struje proizvoditi ljeti, a manje zimi. Cilj je kroz dan dobiti konstantnu vrijednost izlazne snage. S obzirom da veći dio sati nema sunca, a struja se treba konstantno proizvoditi, potrebno je dio električne energije koja se dobije tijekom dana i sunčeve radijacije odvajati i spremati u baterijske spremnike kako bi se popunili "prazni" sati. Zbog mogućih gubitaka u bateriji, pogotovo za ovako malo postrojenje koje proizvodi prosječno po danu u godini 1 MW električne snage, preporučljivo je spremati električnu energiju u baterije samo na dnevnoj bazi. Stoga će "prazni" sati biti pokriveni samo unutar jednog dana pomoću baterijskih spremnika.

Zbog danih uvjeta, postupak proračuna će biti ovakav:

- 1) izračunavanje dozračene energije koja se može dobiti preko panela za svaki sat u određenom danu
- 2) zbrajanje svih dobivenih dozračenih energija u tom danu kako bi se došlo do ukupne vrijednosti dozračene energije kroz jedan dan (a time i električne energije poznavajući stupanj djelovanja pretvorbe)
- 3) ukupna el. energija raspoređuje se ravnomjerno kroz 24 sata

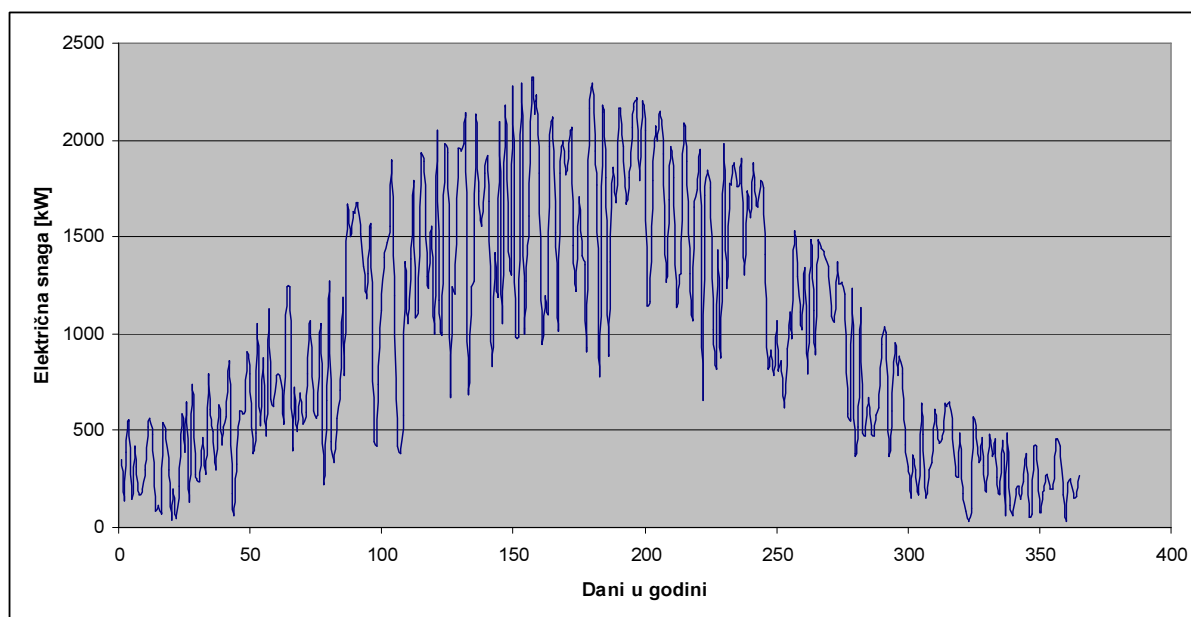
Postavljanjem nekoliko rezultata kroz određene dane u godini pokušat će se donijeti opći zaključak. Treba napomenuti da u sedmom stupcu gdje je izračunata korištena dozračena energija koja se pravilno rasporedila unutar 24 sata je samo podatak za orijentaciju kako bi se vidjelo koliko je energije bilo potrebno da se dobiju slični rezultati kao kod paraboličnih kolektora. U stvarnosti, kao što je rečeno, sva sunčeva toplina se odmah pretvara u el. struju, a "višak" se pohranjuje u baterije kako bi se popunili "prazni" sati.

Mjesec	Datum	Sati	Sati uk.	Insolacija [W/m ²]	Dozr. energija [kW]	Korištena dozr.en. [kW]	El. snaga [kW]
1	1	1	1	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	2	2	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	3	3	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	4	4	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	5	5	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	6	6	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	7	7	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	8	8	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	9	9	48	3474,699596	3541,056706	354,1056706
1	1	10	10	109	7890,463665	3541,056706	354,1056706
1	1	11	11	165	11944,27986	3541,056706	354,1056706
1	1	12	12	258	18676,51033	3541,056706	354,1056706
1	1	13	13	269	19472,79565	3541,056706	354,1056706
1	1	14	14	168	12161,44858	3541,056706	354,1056706
1	1	15	15	98	7094,178341	3541,056706	354,1056706
1	1	16	16	59	4270,98492	3541,056706	354,1056706
1	1	17	17	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	18	18	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	19	19	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	20	20	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	21	21	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	22	22	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	23	23	0	0	3541,056706	354,1056706
1	1	24	24	0	0	3541,056706	354,1056706

Slika 27. Proračun dobivanja el. snage kroz 1. siječnja (3)

7	3	1	4393	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	2	4394	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	3	4395	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	4	4396	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	5	4397	18	1303,012348	21391,11939	2139,111939
7	3	6	4398	121	8759,138564	21391,11939	2139,111939
7	3	7	4399	210	15201,81073	21391,11939	2139,111939
7	3	8	4400	434	31417,07551	21391,11939	2139,111939
7	3	9	4401	607	43940,47197	21391,11939	2139,111939
7	3	10	4402	729	52772,00011	21391,11939	2139,111939
7	3	11	4403	793	57404,9329	21391,11939	2139,111939
7	3	12	4404	738	53423,50628	21391,11939	2139,111939
7	3	13	4405	757	54798,90821	21391,11939	2139,111939
7	3	14	4406	806	58345,99738	21391,11939	2139,111939
7	3	15	4407	651	47125,61327	21391,11939	2139,111939
7	3	16	4408	503	36411,95618	21391,11939	2139,111939
7	3	17	4409	376	27218,48017	21391,11939	2139,111939
7	3	18	4410	229	16577,21265	21391,11939	2139,111939
7	3	19	4411	111	8035,242815	21391,11939	2139,111939
7	3	20	4412	9	651,5061742	21391,11939	2139,111939
7	3	21	4413	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	22	4414	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	23	4415	0	0	21391,11939	2139,111939
7	3	24	4416	0	0	21391,11939	2139,111939

Slika 28. Proračun dobivanja el. snage kroz 3. srpnja (3)



Slika 29. Dobivena električna snaga kroz dane u godini (3)

Kao što se može i vidjeti, situacija je slična, ako ne i ista, kao i kod ORC-a gdje je izvršeno potpuno grijanje medija sunčevom energijom. Najviše snage dobiveno je sredinom godine dakle prije, za vrijeme i poslije ljeta. Najmanje snage je dobiveno očekivano na početku i kraju godine (tijekom zime) kad je najmanja insolacija i najkraće traje dan. Treba naglasiti da u stvarnosti fotonaponski sustavi mogu pridonijeti proizvodnji energije čak i za vrijeme oblačnog dana. Energija neće biti prevelika, ali će svejedno biti proizvedena.

6. TEHNOEKONOMSKA ANALIZA POSTROJENJA

Unatoč dobrim stupnjevima djelovanja nekog postrojenja, čistim metodama, napretkom tehnologije te korištenjem obnovljivih izvora energije najvažniju ulogu ipak igraju financijska sredstva i ekonomsko stanje, točnije isplativost. U slučaju više mogućih rješenja i izvedbi potrebno je ispitati financijsku stabilnost i isplativost svake od njih. Potom se izabire najprihvatljivije i po mogućnosti najdugoročnije rješenje. Svaki od tri postrojenja dani u ovom radu bit će financijski ispitani pomoću tehnoekonomske analize nakon čega će se moći izvući neki zaključci, a pritom i doći do rješenja i vidjeti da li se neke metode uopće isplate. Za takvo što potrebno je što više informacija i podataka. U ovom radu bit će predstavljeni inicijalni (početni) troškovi odnosno ulaganje, životni vijek postrojenja, vrijeme povrata ulaganja te ukupna moguća zarada prije nego postrojenju "prođe" životni vijek (do njegovog zatvaranja i gašenja). Bitno je napomenuti da je ova analiza rađena na temelju vlastitoga ulaganja, a ne posuđivanja i kreditiranja od strane banke. Jedan od razloga za to leži u jednostavnijem proračunu, a drugi i možda bitniji je nedostatak određenih informacija, nepouzdanost banaka s kreditima i kamatama (nagle promjene) zbog trenutne financijske situacije u Europi i svijetu te čestih promjena cijena same struje koju bi HEP ili netko drugi otkupljivao (moguće prilagodba standardima EU-a). Stoga su brojke okvirno (ali realno) postavljene čisto radi usporedbe triju postrojenja. Baš zbog ulaska u EU, dane vrijednosti navedene su u eurima.

Pri analizi uzete su u obzir cijene koje trenutno vrijede za EU u zadnjih 6 godina, stoga postoji mogućnost sitne varijacije [10], dok su uzete trenutno važeće otkupne cijene električne energije od strane HEP-a (0,28 €/kWh). [11] Financijsko stanje pratilo se na mjesečnoj bazi. Zbog toga je uzet prosječni mjesečni prihod. Takav odabir neće ništa promijeniti u analizi jer će unutar godine dana i dalje HEP platiti isti iznos, bio postavljen prosjek ili promjene el. energije na dnevnoj bazi.

ORC sa solarnim kolektorima

Snaga postrojenja (najveći peak): 2.310, 434 kW

Prosječna snaga postrojenja: 1.000 kW

Površina zrcala: 46.676,48 m²

Troškovi ulaganja po kW: 5.200 €

Godišnji troškovi održavanja po m²: 10 €

Ukupni troškovi ulaganja: 12.014.257 €

Ukupni godišnji troškovi održavanja: 466.764, 8 €

Prosječni mjesečni prihod od prodaje struje: 201.600 €

Životni vijek: 25 godina

Povrat ulaganja: nakon 74 mjeseca ili 6 godina i 2 mjeseca

Ukupna moguća zarada: oko 36,8 milijuna €

RC s vodom sa solarnim kolektorima i dodatnim grijanjem plinom

Snaga postrojenja (najveći peak): 1.000 kW

Prosječna snaga postrojenja: 1.000 kW

Površina zrcala: 2.900 m²

Troškovi ulaganja po kW: 5.280 €

Godišnji troškovi održavanja po m²: 10 €

Godišnji trošak plina: 1.575.562 €

Ukupni troškovi ulaganja: 5.280.000 €

Ukupni godišnji troškovi održavanja: 29.000 €

Prosječni mjesečni prihod od prodaje struje: 201.600 €

Životni vijek: 25 godina

Povrat ulaganja: nakon 78 mjeseci ili 6 godina i 6 mjeseci

Ukupna moguća zarada: oko 15,1 milijuna €

Fotonaponsko postrojenje

Snaga postrojenja (najveći peak): 2.310, 434 kW

Prosječna snaga postrojenja: 1.000 kW

Troškovi ulaganja po kW: 10.040 €

Ukupni troškovi ulaganja: 23.198.606 €

Ukupni godišnji troškovi održavanja (procjena): 54.000 €

Prosječni mjesečni prihod od prodaje struje: 201.600 €

Životni vijek: 20 godina

Povrat ulaganja: nakon 118 mjeseci ili 9 godina i 10 mjeseci

Ukupna moguća zarada: oko 24,1 milijuna €

7. ZAKLJUČAK

Radi neke referentne točke i mogućnosti uspoređivanja, postavljen je cilj od 1 MW (1000 kW) prosječno po satu koje bi trebalo proizvoditi svako od tri tipa postrojenja. Primjetno je da se pri ORC-u čiji se radni medij grije kolektorima, te fotonaponskom sustavu električna snaga koju daju mijenja tijekom vremena, dok je kod verzije s RC-om i kombiniranim grijanjem relativno lagano postignuta konstantna snaga s obzirom da nije potrebno skladištenje energije i čuvanje za "prazne" sate jer ih nadoknadi plin. Zbog manjeg stupnja iskorištenja u pretvorbi kod fotonaponskih panela potrebna je puno veća površina panela nego što je potrebna površina kolektora kod ORC-a. Unatoč tome, treba razmišljati na način da je fotonaponski sustav dovoljan sam sebi, dok je verzija s ORC i kolektorima malo kompleksnija. Unatoč konstantnoj izlaznoj snazi u RC-u s vodom treba uzeti u obzir da za takvo postrojenje (čiji su parametri radnog medija u stvarnosti puno viši nego kod ORC-a) kompleksnost je još veća i potrebna je gotovo stalna dobava plina, koji na kraju svega i nije toliko jeftin. Svaki od mogućih rješenja ima uvijek trajanja barem 20 godina [9], što daje za pravo planiranje i dugoročnu zaradu.

Gledajući tehnoekonomsku analizu, može se primjetiti da nije jednostavno odlučiti se koje bi postrojenje bilo najbolji izbor.

	ORC	RC	PV
Troškovi ulaganja	++	+++	+
Povrat ulaganja	+++	++ (blizu +++)	+
Ukupna zarada	+++	+	++

Legenda: +++ – najbolji izbor

++ – srednji izbor

+ – najgori izbor

Iako se ovdje jasno vidi da fotonaponsko postrojenje kaska znatno za druga dva treba imati na umu da ono ima najmanje godišnje troškove održavanja i nabave. U slučaju malih investicijskih sredstava RC s kombinacijom kolektora i plina jako je zahvalno rješenje, ali je najmanja zarada na kraju. I na kraju, kod ORC s kolektorima potrebna jesu malo već ulaganja ali je zato najbrži povrat ulaganja s najvećom ukupnom zaradom. ORC je definitivno opcija za one koji ulažu na duge staze. Naravno, svi ovi zaključci vezani su uz manje proizvodnje električne struje.

Kada bi pričali o velikoj proizvodnji električne energije (desecima i stotinama MW kroz sat itd.), stvari bi se mogle gledati malo drukčije. Kao prvo, trebali bi ogromne količine solarnih panela i kolektora čime bi se postavilo pitanje mogu li i kako podržati tako veliku proizvodnju u nekoj značajnijoj mjeri. Promatrajući RC s vodom i razmišljajući o povišenju parametara vode prije ulaska u turbinu (kako bi se dobila što veća snaga na izlazu), postavlja se pitanje koliko bi uspio parabolični kolektor zagrijati tu vodu i koliko bi doprinosio time da se uštedi na plinu s obzirom na svoju ograničenost i nemogućnost dizanja temperature radnog medija nakon nekog vremena (koliko god bila povećavana površina kolektora). Fotonaponske ćelije imaju već veliku primjenu u Europi, njihovo slaganje poput matrica uvelike olakšava stvari.

Sve u svemu, svako od ovih postrojenja ima svoje pluseve i minuse ovisno o tome za što su namjenjeni i što se očekuje od njih. Osim financijskih, treba razmišljati i o ekološkim razlozima uporabe postrojenja te njegove pristupačnosti.

LITERATURA

- [1] Sunčeva energija
http://hr.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Deva_energija; 18.01.2013.
- [2] Rankineov ciklus (Organski Rankineov ciklus)
http://hr.wikipedia.org/wiki/Rankineov_ciklus#Organski_Rankineov_ciklus; 12.01.2013.
- [3] Organic Rankine cycle
http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle; 12.01.2013.
- [4] Galović, A.: Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [5] Parabolični kolektor
http://hr.wikipedia.org/wiki/Paraboli%C4%8Dni_kolektor; 10.01.2013.
- [6] Photovoltaics (PV)
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>; 14.01.2013.
- [7] Photovoltaic system
http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system; 14.01.2013.
- [8] Fotonaponski solarni sustavi
<http://www.kreativna-energija.hr/default.aspx?tabid=3344>; 14.01.2013.
- [9] Photovoltaic panels and expiry date
<http://solarpanelsmanchester.blogspot.com/2011/09/these-photovoltaic-panels-have-expire.html>; 22.01.2013.
- [10] Kaltschmitt, M., Streicher W., Wiese A.: Renewable energy: Technology, Economics and Environment, Springer, 2007.
- [11] HEP – Hrvatska elektroprivreda
<http://www.hep.hr>; 30.08.2013
- [12] Parabolic trough collector overview
http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/kearney_collector_technology.pdf; 10.09.2013